

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Technická diagnostika vakuových čerpadel

Technical Diagnostics of Vacuum Pumps

Student:

Stanislav Hemala

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Stanislav Hemala**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování**
Téma: **Technická diagnostika vakuových vývěv**
Technical Diagnostics of Vacuum Pumps
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

V rámci bakalářské práce se zabývejte tribologickou analýzou a technickou diagnostikou vakuových vývěv. V rešerši se věnujte teorii obecného vakua, které má v současnosti široký rozsah použití. Navrhněte vhodné tribodiagnostické metody k analýze odebraných zkušebních vzorků. Proved'te potřebné analýzy a rozborů potřebné pro rozbor dané problematiky.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proved'te konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce.

Rozsah práce min. 35 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

CHLUMSKÝ, V., LIŠKA, A. *Kompresory*. SNTL Praha, 1982, ISBN 04-224-82

KOLARČÍK, K., KAMINSKÝ, J., PUMPRLA, O. *Kompresory*. 1.vydání. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA 2004, ISBN 80-248-0704-1

HELEBRANT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost I - Tribodiagnostika*. 1. vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001, 158 s. ISBN 80-7078-883-6

ŠAFR, E. *Tribotechnika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984. 300 s. 04-243-84

ŠAFR, E. *Technika mazání*. 2. dopl. vydání, SNTL Praha - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1970. 381 s. ISBN 04-010-70

HRADECKÝ, F., VLK, M. *Tribotechnika*. 1. vydání, Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické

literatury, 1984. 297 s.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

PETRUŽELKA, J. *Ročníkový projekt. Jak psát bakalářskou práci* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, FS, poslední aktualizace 30. 6. 2009 [cit. 2018-12-11]. Dostupný z [www: <URL: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Rocnikovy-projekt.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Rocnikovy-projekt.pdf)

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry

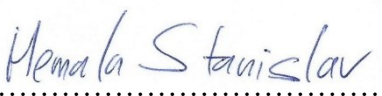


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona.
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve změně pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019


.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Stanislav Hemala

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Moutnice 342, Moutnice, 664 55

ANOTACE BAKLÁŘSKÉ PRÁCE

HEMALA, S. *Technická diagnostika vakuových čerpadel: bakalářská práce*. Ostrava VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2019, 72 s. Vedoucí práce: Ing. Jan Blata, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá tribologickou diagnostikou olejové náplně vakuové vývěvy. V úvodní části bakalářské práce se věnuji obecně vakuu, vakuové technice, tribologii a představení společnosti zabývající se vakuovou technikou. V dalších kapitolách se bakalářská práce zabývá rozbohem servisních činností a rozbohem situace úniku olejové náplně ze zásobní komory vakuové vývěvy a uvedení provedených měření a testů směřujících ke zjištění ztráty provozuschopnosti stroje. Dále jsou popsány tribodiagnostické metody, které byly použity k analyzování olejových vzorků a v závěru jsou zpracovány získané informace z tribodiagnostických měření a zhodnocení výsledků.

ANNOTATION OF BACHLEOR THESIS

HEMALA, S. *Technical Diagnostics of Vacuum Pumps: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design, 2019, 72 s. Thesis head: Ing. Jan Blata, Ph.D.

Bachelor thesis is dealing with tribological diagnostic of vacuum pump oil charge. In the beginning of the paper, vacuum in general, vacuum technology, tribology and company which deal with vacuum technology are presented. In next chapters, bachelor thesis explains service analysis, analysis of situation when oil charge leaking appears from reservoir chamber of vacuum pump or measurements and tests which indicate detect machine uptime losses. Beside that, tribological methods used for oil examples analysis are explained. At the end of the thesis, the results of tribological measurements are processed and evaluated.

Obsah

Seznam použitých znaků a zkratk	9
Úvod	10
1 Vakuum	11
1.1 Vakuová technika	11
1.2 Klasifikace vakua	12
1.3 Jednotky tlaku používané ve vakuové technice	13
1.4 Získávání vakua.....	15
1.5 Rozdělení vývěv	16
1.6 Typy vývěv.....	16
1.6.1 Transportní vývěvy mechanické	18
1.6.2 Transportní vývěvy hybnostní.....	24
1.6.3 Sorpční vývěvy.....	27
2 Tribologie	30
2.1 Tribologický systém.....	31
2.2 Tribologické procesy.....	32
2.2.1 Kontaktní procesy	33
2.2.2 Třecí procesy	33
2.2.3 Procesy opotřebení	34
2.2.4 Mazací procesy.....	37
3 Technická diagnostika	39
3.1 Tribodiagnostika.....	40
4 Edwards.....	41
4.1 Představení společnosti Edwards	41
4.2 Portfolio vakuových produktů na servisním středisku	42
4.3 Vývěvy z produktové řady IQ	42
4.4 Diagnostika vývěv	44
4.5 Průběh operací na servisním středisku	44
5 Současný stav a rozbor provedených diagnostických měření	46
5.1 Vracené kusy na opravu	46
5.2 Specifikace problému	47
5.3 Posudek č. 1 – Ložiska rotoru elektromotoru	48
5.4 Posudek č. 2 – Analýza hřídelových pouzder	50

5.5	Posudek č. 3 – Funkční testování vakuové sestavy.....	52
6	Navrhovaný postup analýzy tribotechnické diagnostiky.....	57
6.1	Charakteristika olejové náplně	57
6.2	Metodika odběru vzorku	58
6.3	Zkoušky čistoty vzorků	58
6.3.1	Stanovení třídy čistoty – NAS 1638.....	59
6.3.2	Stanovení kódu čistoty – ISO 4406.....	60
6.4	Infračervená spektrometrie.....	60
6.4.1	Postup měření.....	61
6.5	Rentgenová spektrometrie.....	62
6.5.1	Postup měření.....	63
7	Dosažené výsledky	64
7.1	Stanovení nečistot	64
7.2	Výsledky spektrální analýzy z infračervené spektrometrie.....	65
7.3	Výsledky rentgenové spektrometrie.....	67
8	Závěr.....	69
	Seznam použité literatury	71
	Seznam příloh	72

Seznam použitých znaků a zkratk

Označení	Jednotka	Popis
ČSN	-	Česká technická norma
CGS	-	Historická soustava jednotek – centimetr, gram, sekunda
MKS	-	Historická soustava jednotek – metr, kilogram, sekunda
SI	-	Mezinárodní systém jednotek
iQMB	-	Mechanický booster – podpurná vývěva
iQDP	-	Typ mechanické vícestupňové suché vývěvy se zub. rotory
PN	-	Podniková norma
HRC	-	Tvrdost materiálu při zkoušení podle Rockwella
HV	-	Tvrdost materiálu při zkoušení podle Vickerse
Viskozita	1 cST	Jednotka veličiny kinematické viskozity
PFPE	-	Perfluoropolyether
ED-XRF	-	Energiově disperzní X-ray fluorescenční spektrometr

Úvod

Bakalářská práce se zabývá bezdemontážní technickou diagnostikou strojního zařízení ke snižování tlaku. Na tomto zařízení se po blíže neurčených provozních hodinách může nacházet defekt v podobě úniku olejové náplně a vydírání drážek od těsnících kroužků v ocelovém pouzdře. Vznik defektů má obecně za následek snížení provozuschopnosti daného zařízení a tím tedy zvýšení nákladů na jeho zpětné uvedení do provozu. Z pohledu dodavatele zařízení jde o zvýšení nákladů v rámci reklamace produktu. Základní předpoklady diagnostiky náhodného defektu spočívaly v ověření kvality vybraných dodávaných dílů, z kterých je zařízení složeno. Tyto komponenty se jeví, že jsou dodávány v souladu s výrobní dokumentací a podléhají požadované kvalitě v rozsahu dle možností k ověření. Námět na bakalářskou práci byl v podobě analyzování tribologických vlastností olejové náplně. Cílem práce je poskytnout informace o tribologickém stavu olejové náplně ve vakuových vývěvách po určité době provozu a na základě toho zjištění doporučit možná nápravná opatření.

1 Vakuum

V technickém průmyslu můžeme obecně považovat vakuum jako tlak plynů v okolním prostoru nižším, než je běžně dostupný v atmosféře za běžných teplot. Pojem vakuum má základ v latinském slově „vacuus“ a lze ho v překladu chápat jako prázdný či prázdňový prostor bez hmotných částic. Jako základní rozdělení můžeme rozdělit na vakuum na přirozené a umělé. S přirozeným vakuem se setkáváme každodenně v běžném životě a jedná se o proces dýchání, kdy nasáváme okolní vzduch do plic, který je dále distribuován v těle. Umělé vakuum vytváříme technickými zařízeními, které pracují na různých způsobech na základě konstrukce zařízení (1).

1.1 Vakuová technika

Vývěvy (neboli vakuová čerpadla z překladu originálu vacuum pumps) jsou technická zařízení, které slouží k získávání vakua. Zařízení pro tvorbu vakua má v průmysl široké uplatnění. Na základě konstrukčního řešení vývěv můžeme tyto zařízení rozdělit do různých kategorií využitelností. Například dle úrovně dosažené hodnoty vakua. Vakuová technika již dnes nemá průmyslové odvětví, kde by nenašla uplatnění.

Tabulka 1 – Přehled využití vakua v technologických procesech (2)

Průmyslové odvětví	Obor	Aplikace	Technologický postup
Elektronika	součástky	Elektronky, obrazovky	Evakuace, getrování, kontrola těsnosti, zátavy
		Integrované obvody	Vakuové napařování a naprašování kovových i nekovových vrstev
		Kondenzátory	Vakuové napařování a naprašování kovu na papír a plastické fólie
		Tranzistory, LED	Vakuová výroba polovodičových vrstev (dopování, napařování)
		Rezistory	Vakuové napařování a naprašování odporových vrstev
		Oscilační krystaly	Vakuové napařování a naprašování kovových vrstev
	Datová média	CD, CD-ROM, DVD	Vakuové napařování kovových vrstev na plasty
Elektrotechnika	Světelné zdroje	Žárovky, výbojky, zářivky	Evakuace, getrování, vakuové plnění, odplynování, pokovování, zátavy, kontrola těsnosti
	Vinutí	Transformátory, motory, tlumivky	Lakování vinutí za horka ve vakuu
Hutnictví	Vakuová metalurgie	Speciální materiály	Vakuové tavení, slinování, pájení, žíhání, kalení, sváření, odlévání, rafinace kovů
Optika	Přístroje	Čočky, hranoly, filtry, zrcadla	Vakuové pokovování
	Spotřební keramika, sklo	Dekoratивní povrchové vrstvy	Vakuové napařování a naprašování kovových i nekovových vrstev
Chemie	Vakuové čištění	Monokrystaly, vysoce čisté látky	Sublimace, zonální tavba, destilace
	Plasty	Vrstvy polymerů	Polymerace monomerů ve vakuu
		Lisování plastů	Lití a lisování plastů ve vakuu
Potravinářství	Potraviny	Masné, mléčné výrobky	Vakuová sterilizace, konzervace, balení, sušení
Zemědělství	Produkty	Obilí, semena	Evakuace, balení, sušení
	Živočišná výroba	Dojení, ošetřování skotu	Automatizované vakuové dojící systémy, ošetřování skotu,
Strojírenství	Manipulace	Automatizované montážní linky	Uchopovací podtlakové přísavky
Ostatní		Plnění porézních materiálů	Vakuové plnění porézních materiálů například olejem (kluzná ložiska)
		Porézní materiály nasáté vodou	Vakuové a sublimační sušení

1.2 Klasifikace vakua

V teoretické fyzice můžeme nalézt pojem dokonalé vakuum, tento pojem představuje stav systému, kde se nachází nejnížší možná energie. Ideální případ dokonalého vakua je takový fyzikální stav, kdy v prostoru se nevyskytuje žádná částice, tomuto tlaku by teoreticky

odpovídala nulová hodnota. Tento stav není v současné technické praxi dosažitelný. Maximální hodnota dosaženého vakua je $1,33 \cdot 10^{-11}$ Pa. Tato hodnota byla dosažena v laboratorních podmínkách. (1). Z praktického hlediska rozlišujeme různé úrovně vakua. Je to ovlivněno konstrukčním řešením daného druhu vývěvy, dále pak měřicími přístroji nebo pracovní oblastí vývěvy. Tyto stupně odpovídají konvenci, tedy nejsou pevně stanovené hraniční limity.

Tabulka 2 – Přehled úrovní dosažitelného vakua (1)

Oblast vakua	Tlak v Pa (N/m ²)	Tlak v hPa (mbar)	Počet molekul na cm ³ (ml)
Atmosférický tlak	$\approx 1,01 \cdot 10^5$	1013,25	$2,7 \cdot 10^{19}$
Hrubé vakuum	$10^4 - 10^2$	100 - 1	$10^{19} - 10^{16}$
Jemné vakuum	$10^2 - 10^{-1}$	$1 - 10^{-3}$	$10^{16} - 10^{13}$
Vysoké vakuum (HV)	$10^{-1} - 10^{-5}$	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{13} - 10^9$
Ultravysoké vakuum (UHV)	$10^{-5} - 10^{-10}$	$10^{-7} - 10^{-12}$	$10^9 - 10^4$
Extrémně vysoké vakuum (XHV)	$< 10^{-10}$	$< 10^{-12}$	$< 10^4$

1.3 Jednotky tlaku používané ve vakuové technice

Nejdříve je nutno definovat pojem tlak a jak jej lze vysvětlit. Jako určitou základní mez tlaku lze chápat zemskou atmosféru. Výši atmosférického tlaku si můžeme představit jako tlak výslednicí silového působení horizontálního plynového sloupce na zemský povrch v úrovni hladiny moře a teplotě 15 °C při tíhovém zrychlení $g = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$. Atmosférický čili normální tlak je dán hodnotou $p = 101325 \text{ Pa} = 1013,25 \text{ hPa} = 1 \text{ atm}$. Tato hodnota není stálá, ale kolísá. Všeobecně rozšířenou a obecně branou jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Jednotka je takto pojmenována po francouzském vědci Blaise Pascalovi. Tato jednotka je definována jako podíl vyvolané síly $F = 1 \text{ N}$ rovnoměrně rozprostřené ku ploše $S = 1 \text{ m}^2$ na níž působící. Při vyjádření jednotky v základní soustavě SI vypadá jednotka tlaku takto:

$$p = \frac{F}{S} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-2} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \rightarrow \text{Pa}$$

Avšak ne vždy se můžeme setkat s jednotkou tlaku v [Pa]. Z dřívější doby nebo ze starší technické či odborné literatury se můžeme setkat i s jinými jednotkami, které se dodnes vyskytují v anglické či americké literatuře. Na základě událostí z minulosti vznikaly snahy o sjednocení jednotek a první z nich bylo zavedení soustavy CGS neboli absolutní systém jednotek. Tento systém se používal na konci 19. století. Brzy byl nahrazen novější soustavou

jednotek MKS, která byla platná až do roku 1960, kdy byla nahrazena dnes již celosvětově rozšířenou soustavou SI. Níže jsou vysvětleny vybrané jednotky používané ve spojitosti s tlakem.

- Torr – Je stará jednotka pro označení hydrostatického tlaku. Velikost 1 Torr odpovídá hydrostatickému tlaku, který je vyvolán sloupcem rtuti o výšce 1 mm při 0 °C na hladině moře a odpovídá tlaku 133,322 Pa. S touto jednotkou se lze setkat při měření krevního tlaku nebo meteorologii (3).
- Atm – Je označení pro fyzikální atmosféru, jež vychází z atmosférického tlaku vzduchu na hladině moře. 1 atm odpovídá 101325 Pa. Normy již nepřipouští použití této jednotky, avšak dříve se používala ve fyzice a přírodních vědách. V rámci této jednotky je nutno zmínit ještě jednotku podobnou. Jde o technickou atmosféru, která se označovala zkratkou písmeny – at. Hojně se využívala v technických oborech. Velikost jednotky 1 at je rovna hydrostatickému tlaku 10 m vodního sloupce na hladině moře a odpovídá ji velikost 98 066 Pa (3).
- Bar – odvozená jednotka ze soustavy SI, odpovídá přibližně jednotce atmosféry a je rovna velikosti 100000 Pa. Pro tuto podobnost se hojně využívala v průmyslu a technice, neboť její hodnota odpovídala v přepočtu velikosti 0,1 MPa. V meteorologii se používala jednotka mbar a ta odpovídá 1 hPa (3).
- Psi – S touto jednotkou se nejčastěji můžeme setkat v angloamerických teritoriích. Jedná se o vyjádření tlaku rovné gravitační síle 1 libry na čtvereční palec a odpovídá ji velikost 6894,8 Pa (3).

Tabulka 3 – Převodové vztahy mezi různými jednotkami tlaku (2)

	Pa	Torr	atm	bar	psi	psf
Pa	1	$7,50 \cdot 10^{-3}$	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,4504 \cdot 10^{-4}$	$2,0885 \cdot 10^{-2}$
Torr	133,322	1	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,9337 \cdot 10^{-2}$	2,7844
atm	$1,0132 \cdot 10^5$	760	1	1,0132	14,6959	2116,22
bar	$1 \cdot 10^5$	750,06	0,9869	1	14,5038	2088,5
psi	6894,76	51,715	0,068	0,0689	1	144
psf	47,88	0,3591	$4,725 \cdot 10^{-4}$	$4,788 \cdot 10^{-4}$	$6,9444 \cdot 10^{-3}$	1

1.4 Získávání vakua

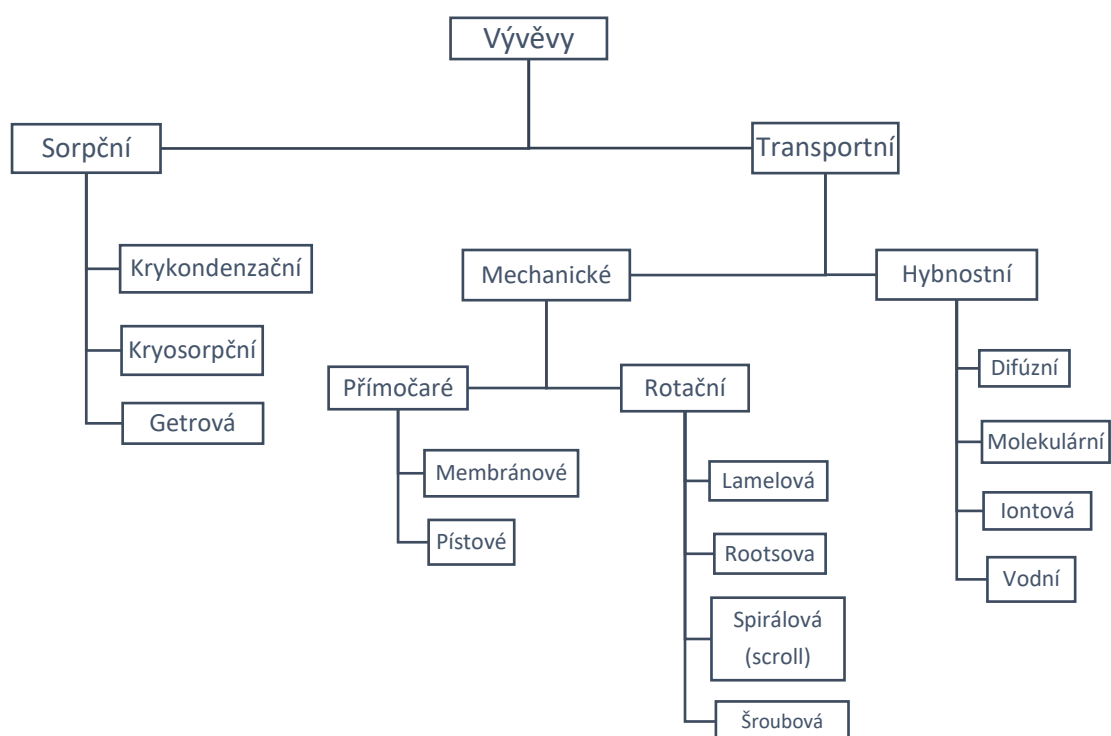
K získávání vakua lze použít mnoho typů vývěv pracujících na různých způsobech. Vakuum vytváříme nejlépe v uzavřených prostorech s vymezenými stěnami. Tímto způsobem se snažíme dosáhnout zředění odčerpávaného vzduchu nebo obecně plynu z prostoru, tak abychom docílili co nejnižšího množství molekul plynu v daném prostoru.

Jednou z hlavních vlastností ovlivňující aplikaci a technologický postup v získání určitého stupně vakua je střední volná dráha molekul plynu při daném tlaku. Tato veličina nám říká, jak velká je průměrná dráha molekuly, kterou urazí, než dojde ke střetu s jinou molekulou. Veličina je nepřímo úměrná danému tlaku. Význam této veličiny spočívá ve snaze o získání nejvyšší hodnoty, neboť tím získáme čistší prostor neboli prostor s nižším obsahem molekul plynu a to je pozitivní účinek pro požadovanou technologickou aplikaci (4).

Při návrhu vakuové aparatury pro danou aplikaci je nutné brát zřetel na možnosti čerpacího mechanismu, který je ovlivněn tlakovými možnostmi. Aby bylo možné dosáhnout určitého stupně vakua, je nutné zohlednit povahu čerpacího mechanismu. Při čerpání plynu z okolní či atmosféry odebíráme plyn jako celek. Pro získání ještě nižších tlaků, vyššího stupně vakua již musí být v čerpacím mechanismu obsaženo zařízení, které bude schopno regulovat samostatné molekuly plynu. Z toho plyne, že pro získání nižších tlaků musí být použity alespoň 2 vývěvy. Čerpací rychlost vývěvy je jedna z dalších charakteristických vlastností vývěvy. Čerpací rychlost je dána objemem plynu, který je přemístěn za jednotku tlaku. Tato veličina je ovlivněna typem a konstrukcí vývěvy. Při dosažení určitého tlaku vývěvy se začne objevovat zpětné proudění, které negativně ovlivňuje čerpací rychlost vývěvy, se snižujícím se tlakem čerpací rychlost klesá. V situaci, kdy se čerpací rychlost blíží nule, označujeme dosažený tlak jako mezní tlak vývěvy. Je to hodnota tlaku, při které čerpací mechanismus již není schopen dosáhnout odčerpáním plynu nižšího tlaku v daném prostoru. Velikost mezního tlaku je ovlivněna konstrukcí zařízení, netěsnostmi v systému a prostředí, zpětným prouděním odsávaného plynu a tlakem nasyceným par pracovního média (5).

1.5 Rozdělení vývěv

Při volbě čerpacího mechanismu je důležité zohlednit střední volnou dráhu molekul, neboť ta je důležitým parametrem pro zvolení vhodného typu vývěvy v závislosti na rozmezí tlaků, které chceme dosáhnout. Odčerpávané plyny, které mají velikost 100 Pa nebo vyšší se chovají jako spojité médium. Kdežto odčerpávané plyny o tlacích menších než 1 Pa se již čerpají jako jednotlivé molekuly. Z toho lze usoudit, že můžeme rozdělit vývěvy na základní 2 velké skupiny, které se dále štěpí na detailnější zařízení (5).



Obrázek 1.1 – Rozdělení vývěv dle způsobu funkce zařízení (2)

1.6 Typy vývěv

Transportní vývěvy

Transportní vývěvy pracují kontinuálním způsobem, nemají omezenou čerpací kapacitu. Nasávají plyn do pracovního prostoru a posléze jej vypouštějí výfukovým potrubím. Plyny mohou být vyfukovány do okolní atmosféry nebo do zařízení k dalšímu zpracování. Tento typ vývěv najde uplatnění při zpracování velkých objemů přečerpávaných plynů

a to především v technologických aparaturách. Transportní vývěvy mohou odsávat pracovní plyny, které mohou svými párami kontaminovat a zanášet pracovní prostor. Rotační olejovou vývěvu je vhodné například použít pro odčerpání plynů v rozsahu 1–10 Pa. Difúzní nebo turbomolekulární vývěvu použijeme, pokud budeme chtít odčerpávat plyn pod velikost tlaku menší jak 1 Pa (5).

Rozdělení transportních vývěv.

- Vývěvy, které na začátku pracovního cyklu zvětšují objem pracovní komory a tím v nich dochází k poklesu tlaku. Posléze v druhé pracovní části se čerpací mechanismus oddělí od čerpaného systému a dochází k přemístění uzavřeného objemu plynu k třetí pracovní fázi, kdy se odčerpávaný plyn vytlačí ven výfukovým otvorem vývěvy. Na tomto principu tvorby vakua pracují zejména rotační olejové vývěvy či pístové vývěvy.
- Vývěvy, kterým je během procesu snižování tlaku v pracovním prostoru vývěvy dodán impuls k přenosu molekul plynu ve směru čerpání. Na tomto principu pracují zejména Rootsovy vývěvy, ale také molekulární nebo turbomolekulární vývěvy.
- Vývěvy, které pracují na základě interakce čerpaného plynu nebo par s transportním médiem vývěvy. Na tomto principu pracují zejména vývěvy difúzní nebo ejektorové.

Sorpční vývěvy

Sorpční vývěvy fungují na odlišném způsobu než vývěvy transportní. Hlavní rozdíl v principu fungování sorpční vývěvy je v tom, že sorpční vývěva váže molekuly nebo páry čerpaného plynu a trvale jsou pohlcovány uvnitř zařízení po celou dobu čerpání. Vývěva pracuje cyklickým způsobem a je vhodná pro použití při požadavku na velmi čisté vakuum nebo pro oblast vysokého vakua, protože nemohou dlouhodobě čerpat velký proud čerpaného plynu. Vývěvy najdou uplatnění především u vědeckých a diagnostických přístrojů (5).

Rozdělení sorpčních vývěv

- Vývěvy, které vážou plyn na chlazené plochy s nízkou teplotou a tím dochází ke kondenzaci plynů nebo par. Na tomto způsobu pracují kryogenní nebo kondenzační.
- Vývěvy, které pracují s aktivními látkami, které jsou schopné fyzikálně vázat molekuly plynu nebo par za nízkých teplot na porézním prostředí. Na tomto způsobu pracují zejména kryosorpční vývěvy.

- Vývěvy, pracující na základě chemické absorpce molekul plynu nebo par na tenké vrstvě se značnou podobností k čerpané hmotě. Plyn se může vázat chemickou reakcí s napařovanou nebo naprašovanou vrstvou. Tento typ vývěv označujeme jako vývěvy sublimační.

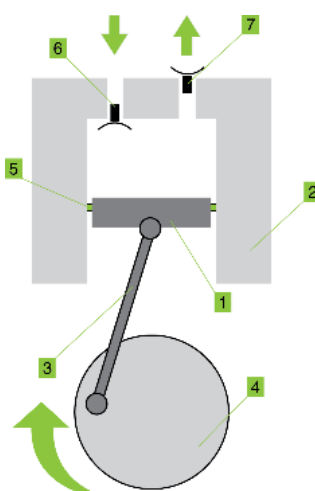
1.6.1 Transportní vývěvy mechanické

Vývěvy přímočaré

Pod tuto skupinu můžeme řadit vývěvy, jejichž základním principem funkce je vytváření přímočarého vratného pohybu, patří sem vývěvy pístové a membránové.

Pístové vývěvy

Základní konstrukce tohoto typu vývěv se skládá z válce, pístu a ventilů. Periodicky opakujícím se pohybem pístu v těsném válci dochází ke změně tlaku a tím odčerpávání plynu. Jde o konstrukčně nejstarší typ vývěvy. Pístové vývěvy s touto konstrukcí mají v porovnání s ostatními vývěvami menší účinnost, která je ovlivněna nevyčerpatelným prostorem v horní úvratí pístu ve válci, funkcí sacího a výfukového ventilu a nižší čerpací rychlost, která je dána vratným pohybem pístu. Proto je vhodné tento typ vývěv používat ve vícestupňovém provedení. Dosáhneme tím větší účinnosti čerpání a vyššího stupně vakua (2).



Obrázek 1.2 – Model pístové vývěvy VP

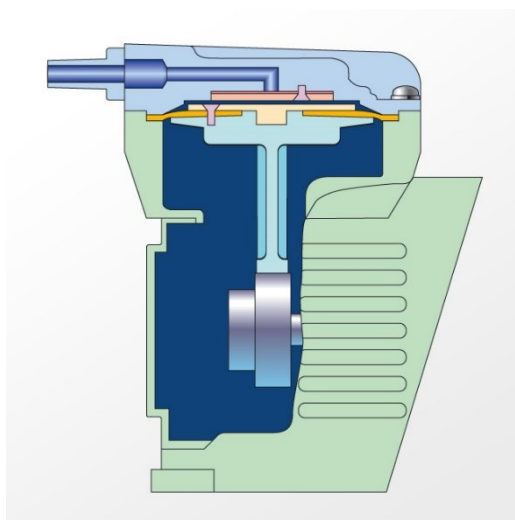
Zdroj: <https://www.in-eco.cz/vyvevy/pistove-vp/>

Poznámka: 1 – píst, 2 – válec, 3 – ojnice, 4 – kliková hřídel, 5 – pístní kroužek,
6 – sací ventil, 7 – výfukový ventil

Membránové vývěvy

Jsou modernější variantou pístových vývěv. Jejich uplatnění je zejména v rozšíření v laboratořích a provozech s požadavkem na dosažení nízkého stupně vakua, řádově 10^2 Pa. Funkčnost vývěvy je omezena mezním tlakem vývěvy, při kterém ještě dojde k otevření sacího ventilu do pracovní komory. Membránové vývěvy se mohou vyskytovat také v hybridním spojení s další vývěvou. V takovémto případě tvoří 1. stupeň a vytváří předvakuum.

Pro čerpání agresivních, korozivních či jinak nebezpečných medií se používá membrána z chemicky inertního materiálu, například z teflonu. Membránové vývěvy mohou být zapojeny do série, což nám přinese užitek v podobě dosažení nižšího mezního tlaku. Nebo mohou být zapojeny paralelně, potom získáme vyšší čerpací rychlost. Nevýhodou vývěvy je opotřebení sacích a výfukových ventilů či vlastní membrány (2).



Obrázek 1.3 – Model membránové vývěvy Katko, Série APN

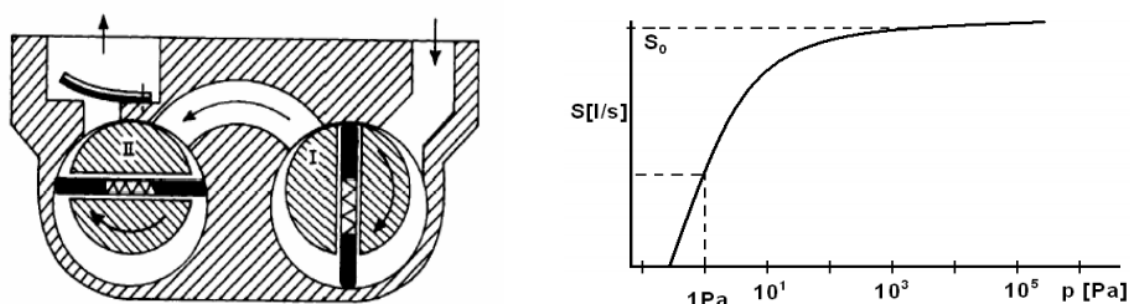
Zdroj: <http://www.katko-cerpadla.cz/cs/cerpadla-iwaki/produkty/vyvevy/serie-apn/>

Rotační vývěvy

Tento typ vývěv je základním druhem, který se používá pro získávání hrubého vakua nebo jako první stupeň pro předčerpání, k dosažení vyššího stupně vakua. Schopnost vytvářet vakuum mají již od odčerpávání z atmosférického tlaku a jsou schopny dosáhnout úrovně až vysokého vakua. Vynikají především velkou čerpací rychlostí a poměrně dlouhou spolehlivostí.

Lamelové vývěvy

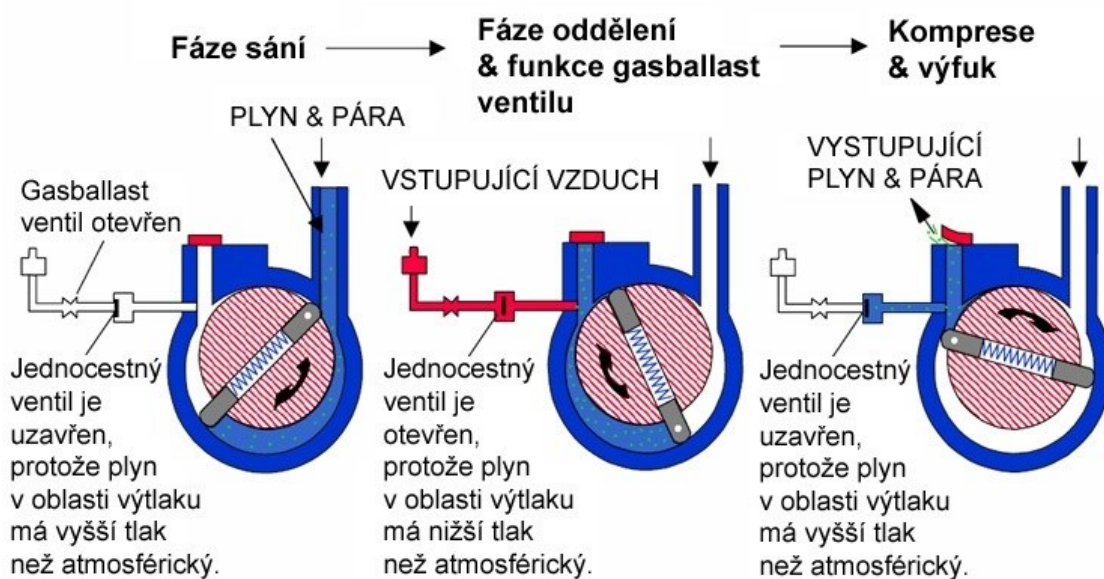
Jejich použití je nejrozšířenější v laboratorní a technologické praxi, kdy se nejčastěji můžeme setkat s rotační olejovou vývěvou. Vývěva funguje na principu excentricky uloženého rotoru ve statorové skříni, kdy rotor je uložen s minimální vůlí u stěny statoru mezi sacím a výfukovým otvorem. Rotor zpravidla má v sobě umístěné středem vedené lopatky neboli lamely, které jsou pružinou odtlačeny od sebe tak, aby vždy doléhaly na statorovou stěnu a tvořily uzavřenou komoru. Výfukový otvor musí být zpravidla vybaven výtlačným ventilem, který má za úkol zabránit zpětnému proudění odčerpávaného plynu zpět do pracovních komor vývěvy.



Obrázek 1.4 – Schéma dvoustupňové rotační lamelové vývěvy a průběh závislosti čerpací rychlosti na tlaku (5).

U rotační olejové vývěvy se olejová náplň nachází v prostoru mezi statorem vývěvy a žebrovaným pláštěm. Olej má za funkci chladit stator vývěvy, kdy v průběhu odčerpávání zajišťuje přenos tepla uvolněný při kompresi čerpaného plynu, nebo při generování tepla vznikajícího od tření lopatek při dotyku v pracovních komorách. Dále zde plní funkci těsnící a mazací, zejména při styku lopatek se statorem, dále při styku rotoru se statorem a u moderních provedení bývá celý stator ponořený v olejové lázni čímž je těsněna celá pracovní komora vývěvy. Olej může vnikat do pracovní komory přes netěsnosti nebo mazacími kanálky. Ven z komory je odčerpáván společně s plynem. Účinnost olejové vývěvy je do značné míry ovlivněna kvalitou použitého oleje. V zásadě se používají základní dva typy olejů a to – minerální (ropné) pro použití na běžné aplikace nebo syntetické, které najdou uplatnění při čerpání agresivních plynů. Při odčerpávání plynu dochází ke kompresi v pracovní komoře a to s sebou přináší úskalí v podobě rozpouštění některých látek obsahujících v čerpaném plynu, např. vodní páry, které kondenzují. V olejové náplni jejich případný návrat zpět do oběhu způsobuje degradaci olejové náplně. Abychom omezili tento jev, používáme vývěvy s proplachovacím efektem. Na vývěvu je doplněn tzv. „Gas ballast“

ventil, ten funguje jako připouštěcí ventil, který vpustí na začátku stlačeného prostoru malou dávku vzduchu z atmosféry a tím dojde k rychlejšímu stoupání celkového tlaku při stlačování plynu v komoře a výfukový ventil se dříve otevře. Výsledkem je, že parciální tlak nasycených vodních pár při 80 °C nedosáhne hodnoty 470 mbar a nebude se vytvářet kondenzát. Použití gas ballast ventilu má za důsledek snížení mezního tlaku a tím tedy i snížení účinnosti vývěvy. Mezní tlak u olejových rotačních vývěv se běžně pohybuje v rozmezí 3 Pa–0,02 Pa, u vývěv v proplachování je mezní tlak nižší a pohybuje se v rozsahu 150 Pa–1 Pa. Čerpací rychlost se pohybuje řádově od jednotek až po stovky litrů plynů za sekundu. Abychom dosáhli vyšších čerpacích rychlostí, lze vývěvy řadit paralelně. Můžeme i do série (2).



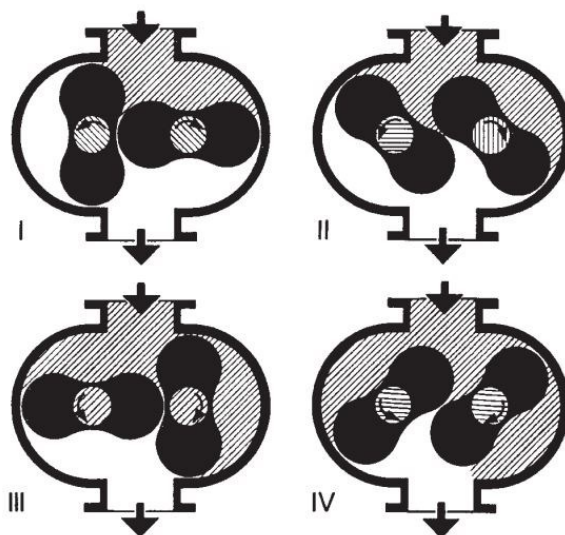
Obrázek 1.5 – Zjednodušené schéma funkce gas ballast ventilu

Zdroj: <http://www.energoekonom.cz/faq>

Rootsova vývěva

Je tvořena dvěma stejnými rotory, jež mají synchronní otáčky zajištěné rozvody v podobě ozubených kol umístěných mimo pracovní komoru vývěvy a otáčejí se proti sobě. Rotory jsou precizně usazeny ve statoru, jejich těsnicí schopnost je zajištěna přesností výroby a dále nastavena velikostí mezery mezi rotory samotnými a mezi rotory a statorem. Na základě velikosti vývěvy a požadovaného mezního tlaku se tyto vůle pohybují řádově v setinách milimetrů a otáčky rotorů se pohybují v tisících za minutu. Jejich předností je vysoká čerpací rychlost. Pracují na principu dmýchadla nebo zubového čerpadla. Rotory mohou připomínat tvar číslovky 8. Někdy se můžeme setkat s označením „piškoty“. Jedná se o druh suché vývěvy, protože v pracovním prostoru nedochází ke vzájemnému tření rotorů

a statoru není vyžadována olejová náplň, která by měla zajišťovat mazání v oblasti pracovní komory. Výhodou takovéto konstrukce je, že nedochází k znečištění vývěvy párami z oleje převodovky. Rootsovy vývěvy bývají velice často používány jako „boostery“ k větším čerpacím systémům. Booster můžeme označit za zařízení, která podporuje ve velké míře čerpací efekt dalších připojených vývěv, např. rotačních nebo šroubových.

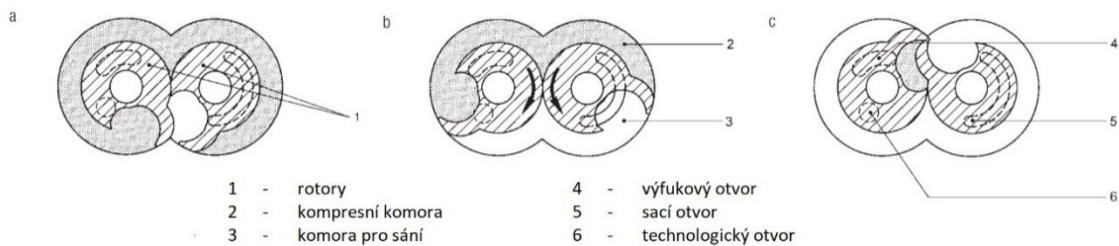


Obrázek 1.6 – Provozní schéma jednostupňové Rootsovi vývěvy

Zdroj: [https://www.leyboldproducts.uk/media/pdf/](https://www.leyboldproducts.uk/media/pdf/bb/04/f6/CP_030_Roots_Vacuum_Pumps_EN5a5f29fbc6ec9.pdf)

[bb/04/f6/CP_030_Roots_Vacuum_Pumps_EN5a5f29fbc6ec9.pdf](https://www.leyboldproducts.uk/media/pdf/bb/04/f6/CP_030_Roots_Vacuum_Pumps_EN5a5f29fbc6ec9.pdf)

Speciální případem fungujícím na principu Rootsovy vývěvy je rotační zubová vývěva. Vývěva nemá symetrické rotory, ale rotory jsou ve tvaru drápu, háku či zubu. Tyto rotory se otáčejí synchronně vůči sobě ve statorovém těle. V pracovní komoře nejsou obecně další pohyblivé části jako například ventily. Ale sání a výfuk plynu probíhá na základě polohy otočení rotorů, kdy se odkrytím nebo překrytím otvory otvírají či zavírají. Takový to typ vývěvy se vyrábí ve víceetapňovém provedení často ve spojení právě s Rootsovými rototy.



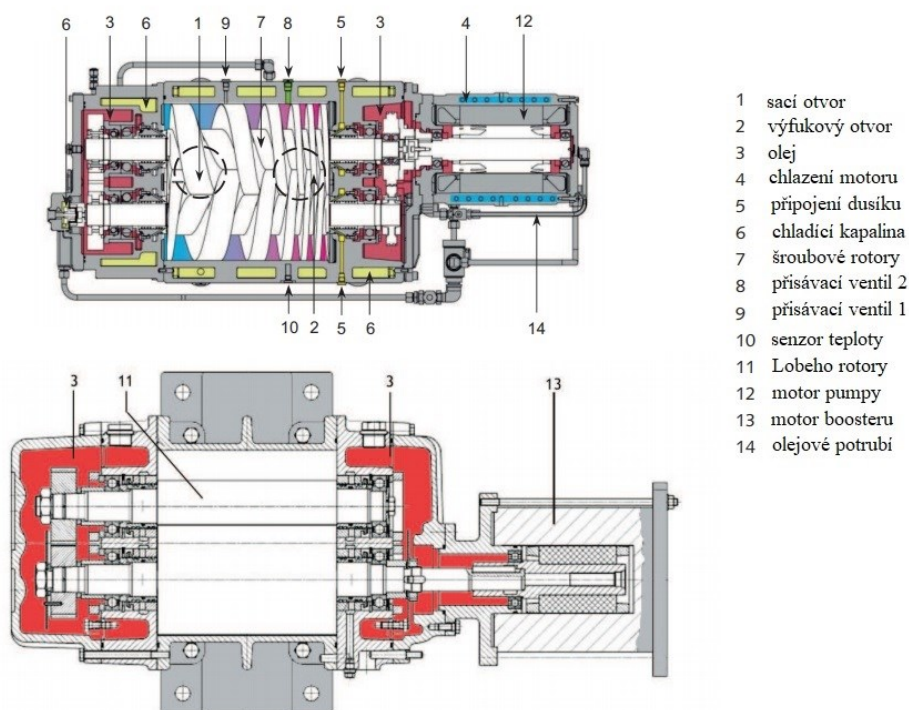
Obrázek 1.7 – Provozní schéma jednostupňové Rootsovi vývěvy

Zdroj: <https://www.leyboldproducts.uk/media/pdf/87/a8/be>

[/FVT_Fundamentals_of_Vacuum_Technology_EN58774555441f3.pdf](https://www.leyboldproducts.uk/media/pdf/87/a8/be)

Šroubové vývěvy

Jedná se o typ vývěvy, která pracuje na podobném principu jako vývěva Rootsova a to tak, že ve statoru jsou umístěny 2 rotory, které se proti sobě otáčejí synchronními otáčkami, bez tření se statorem. Tvar rotorů je vyroben jako šroubovice závitů, která může mít konstantní stoupání, nebo naopak šroubovice může mít proměnlivé stoupání závitů, je to především díky technologii způsobu získávání vakua. Kvalita těsnosti zapadajících šroubových rotorů do sebe je silně spojena s přesností výroby. Sací a výfukový otvor je zde trvale otevřen a vývěva může kontinuálně nasávat plyn, který je rotačním pohybem šroubovic stlačován v komorách rotorů a dopravován k výfukovému otvoru.



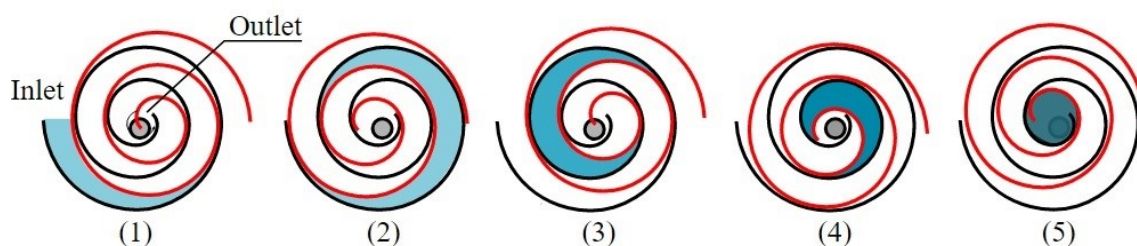
Obrázek 1.8 – Řez šroubovou vývěvou a boosterem

Zdroj: <https://www.buschvacuum.com/documents/10180/403576/Busch-Instruction-Manual-COBRA-DS-9161-A-en-0870772604.pdf>

Spirálová vývěva – Scroll

Vývěva je tvořena 2 rotory, které se též mohou označovat jako scrolls. Scrolly mají tvar Archimedovy spirály a z obou stran jsou kryté čelní stěnou. Přičemž vždy jeden z nich je pevný a druhý rotor koná excentrický pohyb, pouze do vzdálenosti stěny sousedící spirály. Na rotorech jsou vystouplé stěny spirál, které nejsou v kontaktu, ale zároveň usazení rotorů je tak přesné, že se mohou pohybovat vůči sobě s minimální vůlí. Díky excentrickému pohybu

jednoho z rotorů dochází k nasávání plynu do vývěvy a postupným stlačování plynu dochází k přemísťování směrem do středu vývěvy, kde je vyfukován. Vývěvy dosahují vysokého kompresního poměru, vysoké čerpací rychlosti řádově ve stovkách metrů krychlových za hodinu a jejich mezí tlak se pohybuje v jednotkách Pa. Spirálové vývěvy mohou být také konstruovány jako vícestupňové. A použití naleznou hlavně v prostředí, kde není vysoká koncentrace pevných částí v čerpaném plynu, aby nedocházelo ke zvýšenému opotřebení spirálových stěn rotorů. Dále je nalezneme u hmotnostních spektrometrů, elektronových mikroskopů nebo jako vývěva sloužící pro předčerpání turbomolekulárních vývěv.



Obrázek 1.9 – Schéma pracovního cyklu Scroll vývěvy

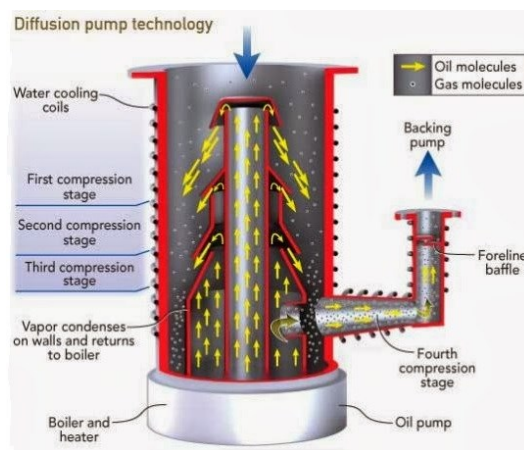
Zdroj: <https://memscyclopedia.org/figure/3VacuumScrollPump.svg>

1.6.2 Transportní vývěvy hybnostní

Molekulám odčerpávaného plynu je předáván rychlostní impuls ve směru čerpání plynu.

Difúzní vývěvy

Nepracuje s pohyblivými částmi ve vývěvě, jak tomu bylo u transportních vývěv, vyjma typu molekulárních vývěv. Základní prvek difúzní vývěvy je čerpací jednotka a dno, v kterém se přivádí k varu vhodná kapalina. Jako pomocné medium se používá olej, který má nízký tlak nasycených par a dosažitelné vakuum je ovlivněno tímto tlakem. Páry oleje se získávají ohřevem kapaliny na dně vývěvy na teplotu varu ve vakuu. Dále jsou páry usměrněny k tryskovému systému kuželového tvaru, který může být proveden několika stupni. Stupně jsou zvoleny s ohledem na to, že dosažitelnost komprese tlaků je nízká. Z trysky proudí páry oleje vysokou rychlostí ke stěnám nádoby, kudy s sebou strhávají molekuly čerpaného plynu a jsou unášeny směrem dolů k výfuku. Olejové páry kondenzují na chlazeném plášti vývěvy a stékají na dno k opětovnému ohřevu (2).



Obrázek 1.10 – Funkční schéma modelu Difúzní vývěvy

Zdroj: <http://supervacindustries.blogspot.com/2013/12/q.html>

Turbomolekulární vývěvy

Tato vývěva pracuje až při určitém stupni předčerpání, není schopna vytvářet vakuum z atmosférického tlaku. Plyn nečerpáme jako celek ale jako jednotlivé molekuly. Turbomolekulární vývěvy pracují na principu mnohastupňové lopatkové turbíny, molekuly plynu přivedené k sání vývěvy jsou dále odčerpávány asymetricky uloženým rotorem ve statorovém těle, který jim uděluje kinetickou energii a dále je vyráží do dalších úrovní lopatek až k výfuku. Pro dosažení vyššího kompresního poměru je zařazeno za sebe více stupňů lopatek. Rychlost otáček rotoru se pohybuje v desítkách tisíc za minutu. Vývěvy dosahují hodnoty vakua 10^{-11} Pa a používají se jako čistá alternativa místo difúzních vývěv, neboť odčerpávaný plyn není kontaminovaný olejovými parami. Nevýhodou může vyšší cena (2).



Obrázek 1.11 – Částečný řez Turbomolekulární vývěvou

Zdroj: <https://www.avtservices.com.au/products/turbomolecular-pumps-turbopumps/>

Vodní (kapalinová) vývěva

Vodní vývěva pracuje na principu proudění pracovní tekutiny, která je přiváděna do pracovní komory, kdy kuželový proud tekutiny strhává ve směru proudění molekuly čerpaného plynu. V pracovní komoře se tlak mění podle Bernoulliho rovnice, tlak v místě rychle proudící kapaliny je nižší než v místě, kde kapalina proudí pomaleji. Z toho důvodu vzniká v pracovní komoře podtlak a plyn je čerpán z prostoru a odchází společně s tekutinou z vývěvy. Proudící kapalina napomáhá v odsávání tím, že předává hybností impuls molekulám plynu ve směru čerpání. Vodní vývěva dosahuje menších čerpacích rychlostí, řádově desetin litrů za minutu a dosahuje mezní tlak v oblasti kPa. Jedná se o konstrukčně jednoduchou vývěvu, která nalezne uplatnění v laboratořích, např. jako podpora průtoku kapaliny při přefiltrování (2).



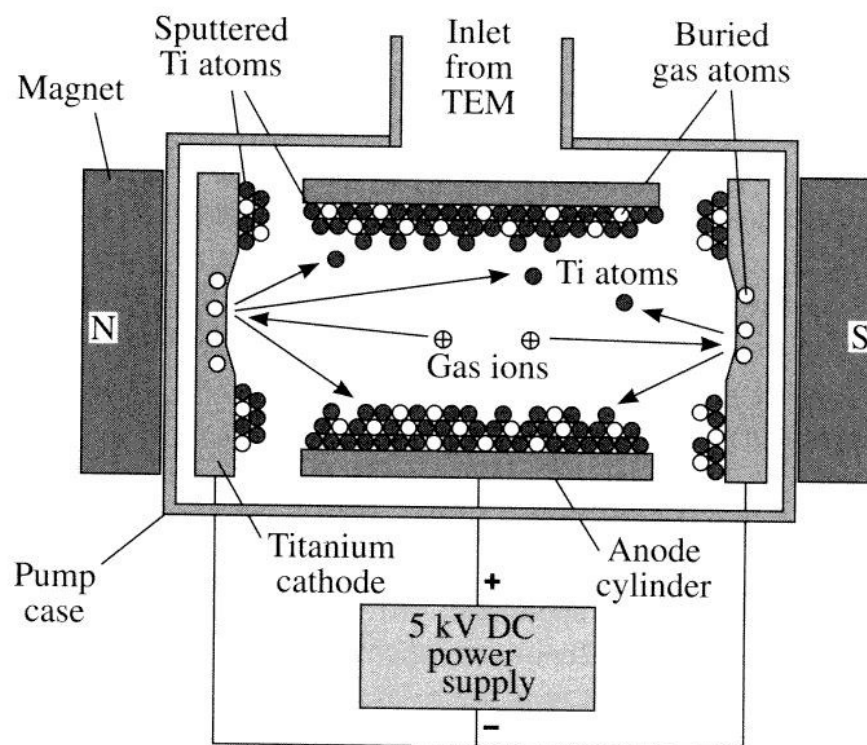
Obrázek 1.12 – Schéma a model kapalinové vývěvy

Zdroj: http://physics.muni.cz/~dorian/Fialova_Vyvevy.pdf

Iontová vývěva

Tento typ vývěvy můžeme zařadit jak do transportních vývěv, tak i do sorpčních. Vývěva pracuje na principu, že molekulám odčerpávaného plynu je předáván impuls ve směru čerpání proudem nabitých částic a poté jsou molekuly plynu vázány na stěny ve vývěvě. Iontová vývěva je tvořena 2 stěnami, které označíme jako katody a mezi nimi je trubicová katoda. Na anodu je přiváděno elektrické napětí o velikosti několika kilovolt, které způsobí následně výboj a tím dojde k rozprašování materiálu elektrod na okolní stěny. Výboj se uskutečňuje v magnetickém poli od permanentního magnetu, který je umístěn kolmo k rovině elektrod. To zapříčiní, že se elektrony pohybují v magnetickém poli na dlouhých šroubovicových trajektoriích a zvýší se pravděpodobnost srážky s molekulami čerpaného plynu. Po srážce jsou plyny ionizovány a vzniklé ionty jsou strhány k povrchu titanových

katod, na které se adsorbují. Na základě výše popsané funkce, lze uvést, že iontová vývěva pracuje v cyklech, lze s ní dosáhnout velmi vysokého vakua, řádově 10^{-10} Pa díky čemuž vývěva najde uplatnění při použití v elektronových mikroskopech, vědeckých přístrojích či hmotnostních spektrometrech. Nevýhodou vývěvy je vysoká cena, vyšší příkon elektrické energie, hmotnost zařízení, nižší čerpací rychlost a potřeba obnovy elektrod.



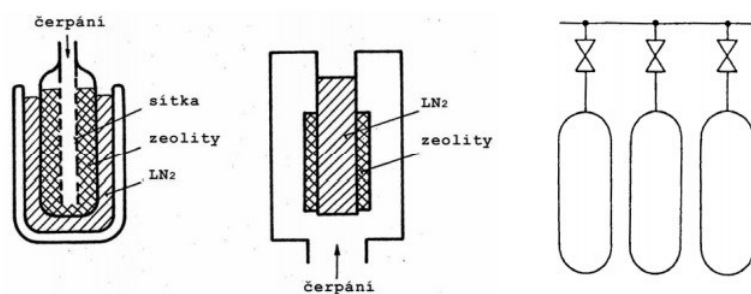
Obrázek 1.13 – Schéma a model kapalinové vývěvy

Zdroj: http://physics.muni.cz/~dorian/Fialova_Vyvevy.pdf

1.6.3 Sorpční vývěvy

Kryondenzační vývěvy

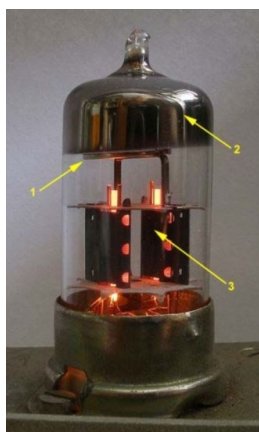
Plyny jsou z odčerpávaného prostoru vázány na stěny chladného povrchu, tím vzniká vrstva kondenzovaného plynu, která může dosahovat i několika centimetrů. Sorpční vývěvy mají tu vlastnost, že odčerpávané molekuly netransportují dále a tak k jejich provozu stačí pouze jeden vstupní otvor. Stěny kryokondezační vývěvy kryopanely musí mít nižší teplotu než je kritická teplota čerpaného plynu. Tento jev způsobí, že odčerpávané plyny nezkapalňují, ale rovnou tuhnou a při opačném procesu dochází k sublimaci. Kondenzační teplo od zachycených molekul odčerpávaného plynu musí být z kryopanelu odváděno



Obrázek 1.15 – Schéma Kryosorpční vývěvy (5)

Getrová vývěva

Getr (pocházející z originálního výkladu anglického slova getter) označujeme tak látku, která se přidává do vakuových zařízení, je aktivní materiál, který má schopnost vázat nebo absorbovat molekuly plynu a dále je neuvolňovat. Getrové materiály se využívají například při výrobě elektronik, obrazovek či osvětlovacích trubic, kde zajišťují udržení a zlepšení parametrů vakua. Getrovací látka se nanáší odpařením při indukčním ohřevu ve vakuu, obvykle se používá baryum a jsou pohlceny zbytky odčerpávaného plynu po nedokonalém odsátí vývěvou. Getrovací páry se posléze srazí na baňce v tuhém skupenství a vytvoří getrové zrcátko. Pokud dojde k poškození vakuového prostoru v baňce getrové zrcátko rychle zareaguje na přítomnost jiného plynu vznikem bílých oxidů.



Obrázek 1.16 – Schéma Kryosorpční vývěvy (2)

1 – kroužek s getrovací látkou (Ba), 2 – getrové zrcátko, 3 – elektronka

2 Tribologie

Tření je jev, který si zejména uvědomíme, pokud přemísťujeme tělesa, která jsou ve vzájemném styku vůči sobě. Tření nemusí být jenom překážka, kterou se snažíme určitými způsoby minimalizovat, ale je to i jev, který se snažíme cíleně vytvářet. Se vznikem tření je spojen další jev a to tvorba tepla. Tuto vlastnost využívali v dobách dávných naši předkové třeba při získání ohně. Projev a existence tření se nám ukáže v podobě opotřebení.

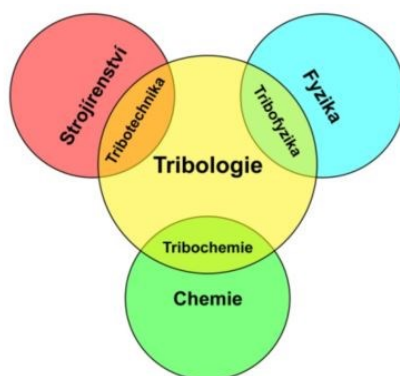
Účinky tření lze charakterizovat jako:

- Projev třecí síly a třecích momentů
- Přeměna mechanické práce v teplo
- Inicializaci opotřebení

Prostředek pro snižování opotřebení je dílčí část požadavku na zvýšení kvality výrobku. Jako signalizaci zvětšujícího opotřebení se může projevovat vznik rázů ve stycích, kde tak roste dynamické namáhání, které může přejít až do únavového lomu nebo jiného stavu poruchy. Dále pokud je zjevné chvění, hluk a rázy, případně i zadírání při zvyšování třecích sil. Na problémy s třením, opotřebením a na obecný kontakt těles zareagovali výzkumníci v druhé polovině dvacátého století intenzivním výzkumem. Dali podnět ke vzniku interdisciplinární nauce o vzájemném působení povrchů při jejich relativním pohybu s názvem Tribologie. Pod tímto oborem se dále nacházejí nauky jako tribofyzika, jež se zabývá fyzikálními aspekty dotýkajících se povrchů, tribochemie posuzuje chemické působení dotýkajících se povrchů s chemicky aktivním médiem a dále tribomechanika, která se zabývá mechanikou vzájemného působení styků povrchů při tření. Tribotechnika je oblast z tribologii, které je věnována největší pozornost. Přínos v uplatnění tribotechniky v konstrukci, výrobě a provozu přináší zejména:

- Snižování třecích odporů a dosažení úspor v energii.
- Snižování opotřebení nebo detailnější prognózování stavu technického prostředku a předcházení haváriím či odstávkám při rozsáhlejších poruchách.
- Použití vhodných materiálů, technologií a způsobu provozování tak, že dosáhneme delší životnosti.

Z výše uvedeného vyplývá, že Tribologie spojuje poznatky z více vědních oborů (6).



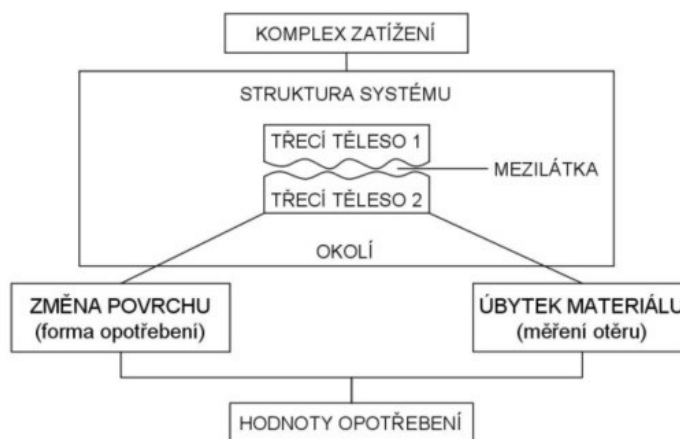
Obrázek 2.1 – Propojení Tribologie s významnými obory (7)

Již od počátku, kdy se lidé začali zajímat o tření, a bylo patrné, že tření se dá zmenšit, pokud mezi stykové plochy těles přivedeme některé látky, a to především mazivo. Na základě oddělení stykových ploch od sebe, a zdali se mezi nimi nachází mazivo nebo nikoliv rozlišujeme tření na:

- tření suché (bez maziva)
- tření s tuhým mazivem
- tření s kapalným nebo plastickým mazivem
- tření s mezivrstvou plynu

2.1 Tribologický systém

Je systém základní úrovně, kterém probíhá proces tření v důsledku vzájemné interakce alespoň dvou struktur systémových částí. Na tento proces pohlížíme jako na jeden třecí uzel. Základní struktura jednoho třecího uzlu běžně představují čtyři prvky. Tribologický systém rozdělujeme na umělý a přirozený. V rámci přirozeného tribologického systému máme na mysli především klouby a pohybový aparát. A umělý tribologický systém se zaměřuje na části technických systémů (8).



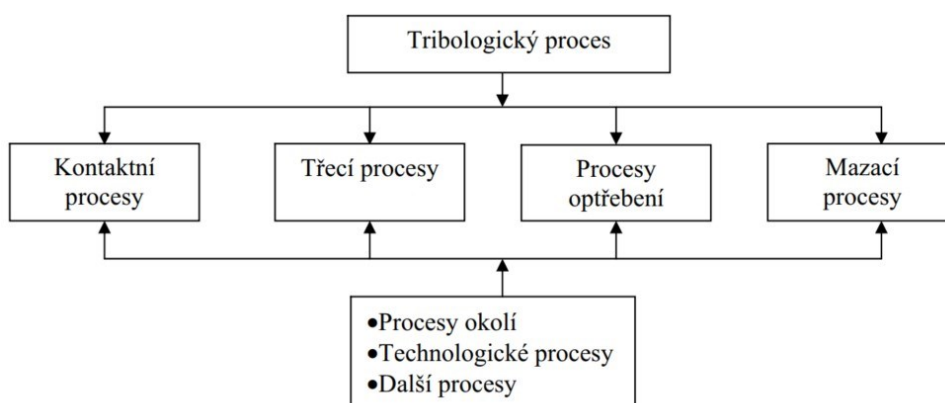
Obrázek 2.2 – Tribologický systém dle DIN 51 320 (7)

1 – základní třecí těleso, 2 – třecí těleso, 3 – mezilátka, 4 – okolí

2.2 Tribologické procesy

Je vnímán jako proces interakcí třecích těles, mezi látky, a okolního prostředí v daném prostoru a čase. Mezi látka je aktivní prvek, která má přímý vliv na funkci tribologického systému. Okolní prostředí je pasivní prvek, nepřímo se podílí na transformační funkci. V rámci tribologických procesů, hledáme řešení na otázky jednotlivých vazeb a zařazení (8).

- Jaké jsou mechanismy přeměny užitečných veličin a jaké jsou skutečné fyzikální procesy přeměn energií.
- Jaké jsou procesy vedoucí ke ztrátám ať již v podobě energetické ztráty třením, materiálové ztráty, nebo i vznik a mechanismus opotřebení.
- Jaké jsou možnosti pozitivního působení na mechanismus vzniku ztrát a jejich minimalizaci.



Obrázek 2.3 – Zařazení tribologických procesů do vzájemných vazeb (8)

2.2.1 Kontaktní procesy

Lze chápat jako vzájemný dotyk aktivních členů tribologického systému, je nutný pro splnění požadované technické funkce a je primárním jevem vyjadřující kontakt třecích těles. Kontaktní proces je ovlivněn počtem těles, vlastními rozměry těles, fyzikálními, chemickými a mechanickými vlastnostmi těles, velikostí normálových a tečných napětí, dále druhem a rychlostí vzájemného pohybu. Rozeznáváme kontaktní procesy na dva základní druhy. A to na pružný (elastický) kontakt a posléze na plastický kontakt.

V místě kontaktu třecích těles dochází ke změně mechanické energie přivedené do systému. Může docházet ke vzniku ztrát, které mohou mít za důsledek deformační vlastnosti dotýkajících se těles (8).

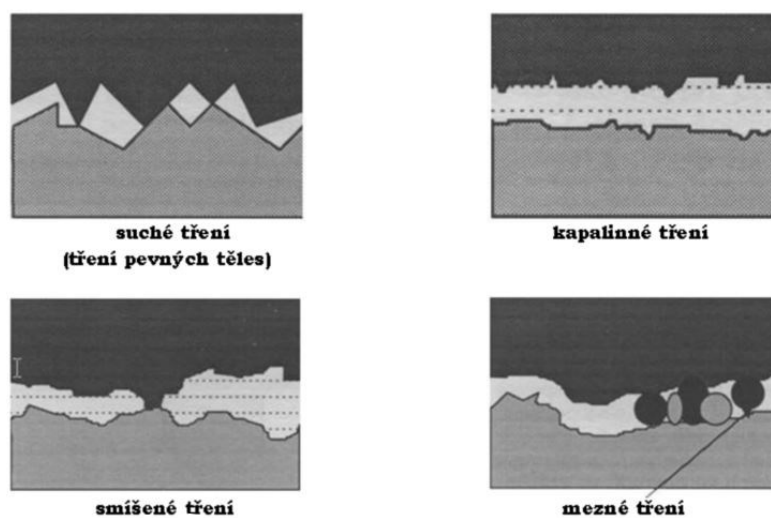
2.2.2 Třecí procesy

Obecně tření je přírodním jevem, které se vyskytuje všude okolo nás. Charakter procesu tření je vázaný na relativní pohyb alespoň dvou dotýkajících se prvků tribologického systému. Z definice pojmu tření lze konstatovat, že s jedná o děj, kdy se změní mechanické energie v průběhu, na začátku nebo ukončením relativního pohybu navzájem se dotýkajících materiálových oblastí (7).

Dle oddělení třecích povrchů rozlišujeme tyto druhy tření:

- Tření pevných těles – dotýkající se tělesa jsou v pevném skupenství. Tření těles vychází ze vzájemné interakce dotýkajících povrchů, jež mají charakteristické vlastnosti adhezivních vrstev.
- Kapalinové tření – v prostoru, kde se nachází vrstva materiálu, v níž se tvoří tření, musí mít vlastnosti kapaliny. Smykové napětí, které se vytváří relativním pohybem je ovlivněno viskozitou mezilátky a představuje odpor proti pohybu.
- Plynové tření – podobně jako kapalinové tření, ovšem třecí vrstva je tvořena plynem. Lze najít u zařízení, které pracují ve vysokých teplotách (300 °C) nebo ve vysokých obvodových rychlostech (10 000 min⁻¹).
- Smíšené tření – Je určitým způsobem zvláštní způsobem kapalinového tření. Může nastat, když dojde ke ztenčení mazací vrstvy až na takovou úroveň, kdy dojde ke vzájemnému kontaktu povrchů třecích těles. Pokud by dále byla

vrstva maziva zmenšována, je možné dojít až na limitní stav, poté se již jedná o mezní tření.



Obrázek 2.4 – Rozdělení tření dle míry oddělení třecích povrchů (7)

Rozlišujeme tření na základě míry pohybu:

- tření klidové (statické) – tření s největším součinitelem
- tření pohybové (kinematické)
- tření nárazové (vibrační)

Rozdělení tření na základě druhu pohybu těles vůči sobě:

- kluzný pohyb (smykový)
- valivý pohyb
- rotační pohyb
- nárazový pohyb
- oscilační pohyb
- tečení

2.2.3 Procesy opotřebení

Opotřebení je základní jev v tribologickém procesu, který nelze zcela odstranit. Výsledkem opotřebení je trvalý úbytek materiálu z povrchu pevných těles při jejich vzájemném kontaktu, relativním pohybu nebo při pohybu média.

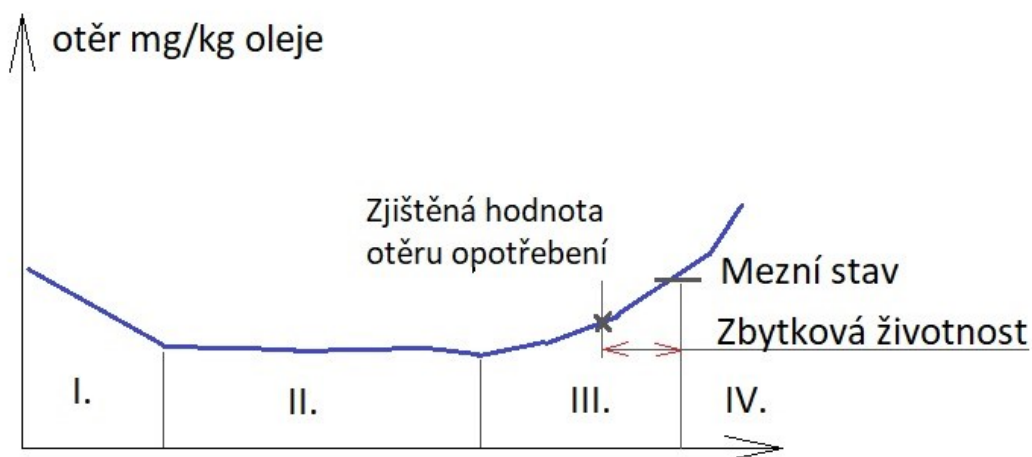


Obrázek 2.5 – Znázornění obecných faktorů vlivu na proces opotřebení (8)

Opotřebení se může projevit jako:

- Forma změny velikosti a tvaru povrchových materiálových oblastí na tělese (tzn. deformace, zpevnění, změknutí, oddělení, sublimace, spájení, přenášení).
- Děj materiálových změn povrchových materiálových oblastí na tělese (tzn. absorpce, difuze, legování, trioxidace, tribokoroze apod.). (8)

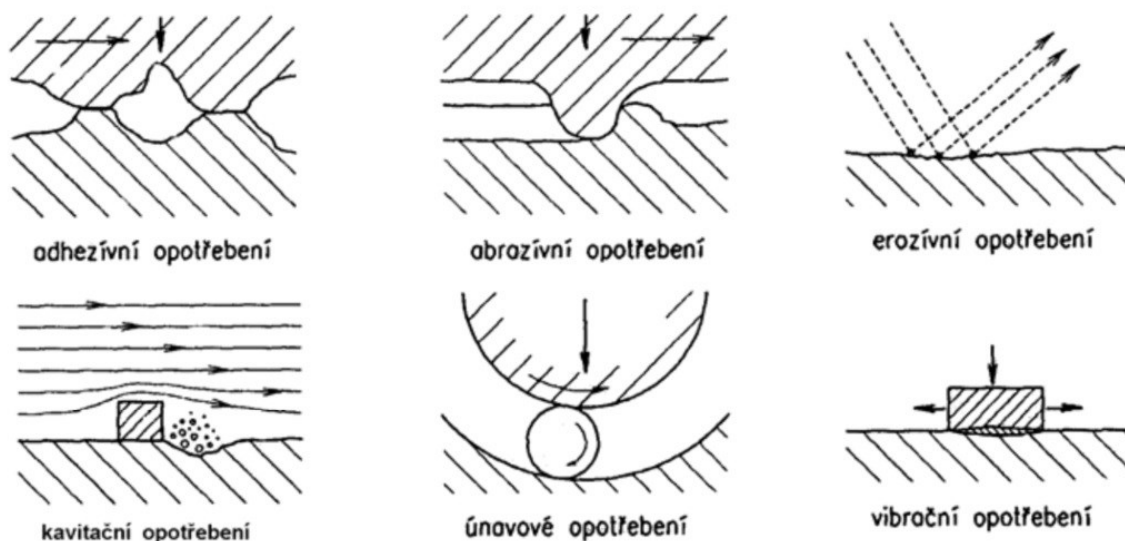
Obecný průběh opotřebení lze nejlépe ukázat Vanová křivka. Opotřebení se projeví jako časový průběh v závislosti na koncentraci ošetrových částic ve zkušební vzorku.



Obrázek 2.6 – Vanová křivka (7)

I – oblast záběhu, II – oblast provozního opotřebení, III – oblast zvýšeného opotřebení a včasné zjištění, IV – oblast poruchového stavu

Základní rozdělení druhů opotřebení:



Obrázek 2.7 – Základní druhy opotřebení (6)

Adhezivní opotřebení je označováno opotřebení, kde při relativním pohybu funkčních povrchů může dojít k vzájemnému dotyku, nebo k narušení povrchové vrstvy či k čistému styku kovů při vzniku mikrosvářů s následným porušením mikrospojů. Tento jev má za důsledek přenos materiálu z třecích povrchů navzájem vůči sobě a vytrhávání částic materiálu. Tento děj je ovlivněn přítomností maziva mezi stykovými plochami, pokud je dostatečné množství maziva v třecích oblastech podmínky pro vznik mikrosvářů jsou potlačeny. Při silně adhezivním opotřebení lze konstatovat, že se již jedná o zadření (6).

Abrazivní opotřebení je způsobeno rozrýváním a zařezáním do měkkého povrchu tělesa drsným povrchem druhého tvrdšího tělesa. Stejný účinek může být způsobem oddělenými částicemi z funkčních povrchů, pokud zůstanou mezi pohybujícími se povrchy, nebo při vnikání částic a nečistot z okolního prostředí mezi funkční plochy. Typickým projev abrazivního opotřebení jsou rýhy na povrchu tělesa (6).

Erozivní opotřebení vzniká při proudu kapaliny nebo plynu, který s sebou může nést pevné částice, a ty porušují povrch tělesa. Porušení povrchu je nerovnoměrné, je ovlivněné charakterem částic a rychlostí pohybu (8).

Kavitační opotřebení je způsobeno oddělováním částic a poškození povrchu tělesa v oblasti, kde zaniká kavitační bublina v kapalině. „Při proudění kapaliny se v místech, kde její tlak poklesne pod tlak nasycených par při dané teplotě, tvoří malé kavitační dutiny –

bubliny, vyplněné parami. Pohyb kapaliny zániku bubliny způsobuje hydrodynamické rázy, jimiž je namáhán povrch součásti v blízkosti, a je spojen s vytrháváním částic z povrchu.“
(6).

Únavové opotřebení nastává při opakujícím časově proměnném namáhání povrchové vrstvy materiálu, kdy dochází k vysokým kontaktním namáháním. Vznikají malé trhlinky, na povrchových a podpovrchových vrstvách materiálu, které se dále šíří, spojují až do fáze, kdy může dojít k uvolnění částic materiálu z povrchu a dojde k vytvoření důlků, dolíčků (6).

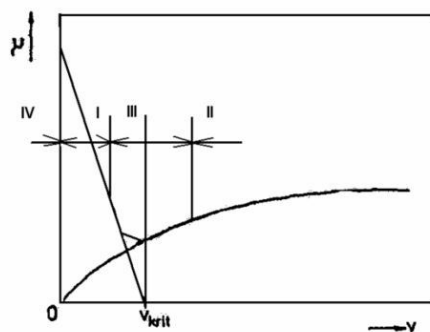
Vibrační opotřebení vzniká především při působení normálového zatížení v kombinaci s kmitavými pohyby o velmi nízké amplitudě. Vibračním opotřebením vznikají částice, které připomínají produkty koroze a mohou adhezivním způsobem narušovat povrchovou vrstvu tělesa. Dále působí jako silné abrazivum, které dokáže narušit i tvrdé povrchové vrstvy (6).

2.2.4 Mazací procesy

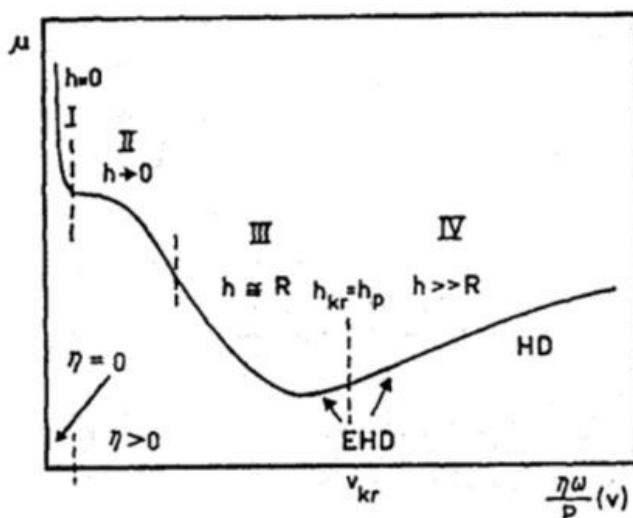
Mazání popisuje účinek maziva v oblasti třecích ploch těles. Správná volba maziva značně ovlivňuje proces mazání. Maziva jsou v tribosystému brána jak konstrukční prvky. Hlavním úkolem je zabránit přímému styku povrchů třecích těles při jejich vzájemném pohybu, tak aby se zabránilo opotřebení a zároveň se snížilo tření.

Z pohledu dokonalosti vytvořené mazací vrstvy a zvoleného maziva můžeme rozlišit oblasti mazání do několika skupin. Plné mazání nastává při odpovídající rychlosti vzájemného pohybu třecích těles, nízkému zatížení a příslušné viskozitě (7).

- I – mazání s přerušovanou vrstvou kapalného maziva při smíšeném tření
- II – mazání s vytvořenou celistvou vrstvou kapalného maziva při kapalinovém tření
- III – mazání s vrstvou kapalného maziva, jehož vlastnosti se v důsledku místního vysokého zatížení výrazně liší od původních
- IV – mazání tuhými mazivy



Obrázek 2.8 – Oblasti mazání v Stribeckově diagramu (8)



Obrázek 2.9 – Upravený Stribeckův diagram (8)

I – oblast suchého tření, II – oblast mezního tření, III – oblast smíšeného tření,

IV – oblast hydro (HD) a elastohydrodynamického (EHD) tření (mazání).

h – tloušťka mazací vrstvy, R – drsnost povrchu, h_{kr} – tloušťka filmu při kritické rychlosti

v_{kr} při přechodu ze smíšeného do kapalinového tření, μ – koeficient tření

V závislosti na stavu maziv v jakém se nachází, rozlišujeme základní čtyři druhy:

Maziva tuhá (pevná), kapalná maziva, plastická maziva a plynná maziva. Z konstrukčního hlediska je nejvhodnější pro tribologický uzel použití kapalinového mazání.

3 Technická diagnostika

„Použití metod technické diagnostiky a údržby jsou jednou z nezbytností pro včasnou identifikaci vznikajících poruch nebo pro zajištění bezpečného, ekonomického a ekologického provozu strojních zařízení. Úkolem metod technické diagnostiky je včasná identifikace vznikající závady, což umožní vysokou bezpečnost a spolehlivost strojních zařízení. Včasné odhalení vznikající závady umožní také naplánování a provedení opravy s dostatečným předstihem a také ve vhodném termínu. Aplikací technické diagnostiky a údržby je v první řadě dosahováno bezpečnosti provozu, resp. ochrana pracovníků před nenadálými vlivy poškození stroje a současně je dosahováno ekonomicko-ekologického provozu. Pro zajištění těchto úkolů je využíváno velké množství metod technické diagnostiky. Bohužel žádná metoda není stoprocentní nebo použitelná na všechny zařízení nebo za všech provozních podmínek, proto velmi často dochází ke kombinaci jednotlivých metod a tím ke zvýšení pravděpodobnosti včasné identifikace vznikající poruchy a tím zabránění ohrožení zdraví a života obsluhy, výpadkům výroby, primárním a druhotným škodám na zařízení.“ (9, s. 4).

Cílem technické diagnostiky je poskytnout objektivní informace o technickém stavu kontrolovaného zařízení a posléze zajistit schopnost nadále vykonávat požadované funkce a tím zajistit provozuschopnost (10).

Základní rozdělení technické diagnostiky:

- Technická nedestruktivní diagnostika (TND), která je více známá pod označením defektoskopie. Vyšetřuje a zkoumá vnitřní, povrchové vady a necelistvosti.
- Technická bezdemontážní diagnostika (TBD), jež se dále větví na podskupiny:
 - Testová diagnostika a její hypotézy – testování vybraných technických parametrů, tzn. funkční diagnostika.
 - Provozně technická diagnostika – dělíme dále na základě měření fyzikálně diagnostických parametrů na vibrodiagnostiku, tribodiagnostiku, termodiagnostiku, akustickou diagnostiku (10).

3.1 Tribodiagnostika

Je metoda bezdemontážní technické diagnostiky, která využívá k informování o stavu technického prostředku vlastností maziv a současně informuje o kvalitě vlastního maziva. Informace o technickém stavu stroje získáváme vyhodnocením různých metod tribotechnické diagnostiky.

Použitím metod tribotechnické diagnostiky můžeme u maziv sledovat trend kvality samotného maziva. Lze zjišťovat degradaci neboli stárnutí, a tím máme možnost určit životnost maziva, respektive provést takové kroky, kterými jsme schopni prodloužit funkčnost mazací náplně tak, aby byla vyčerpána její skutečná životnost (9).

Obecným cílem tribotechnické diagnostiky je zjišťovat, vyhodnocovat a oznamovat výskyt cizorodých látek v mazivu a vyhodnocovat je jak z pohledu kvalitativního, tak i z kvantitativního. Vhodnou interpretací podání výsledků rozborů z provedených zkoušek nám dovoluje včasné poskytnout informace o příznacích vznikajících poruch, nebo umožní lokalizaci vzniku závady.

Sledováním stavu opotřebení, jednotlivých třecích uzlů v tribologickém systému strojního zařízení, provádíme na základě stanovení obsahu otěrových kovů v mazivu. V třecím uzlu se postupně kontaktní plochy opotřebovávají a vlivem cirkulace olejové náplně dochází ke strhávání otěrových částic kovů, které zůstávají v olejové náplni ve formě suspenze. Se zvýšeným množstvím nečistot v olejové náplni souvisí nejen zvýšené opotřebení mazaných částí strojního zařízení jako celku, ale může vést i k poruchám funkce mazací soustavy. Použitím zkušebních metod tribotechnické diagnostiky získáme informace o dvou hlavních tématech (8).

- **Technický stav strojního zařízení**

- *Metody pro stanovení koncentrace otěrových kovů*
 - Atomová spektrofotometrie
 - Atomová emisní/ absorpční spektrofotometrie
 - Polarografie a Voltametrie
 - metoda RAMO
- *Metody pro hodnocení morfologie a distribučního rozdělení částic kovů*
 - Částicová analýza – Ferografie s vyhodnocením

- **Degradace samotného maziva**
 - *Fyzikálně chemické parametry maziva*
 - Kinematická viskozita
 - Bod vzplanutí
 - Obsah vody
 - Číslo celkové alkality a kyselosti
 - Conradsův karbonizační zbytek
 - Kapková zkouška
 - Celkové znečištění
 - Mechanické nečistoty
 - Spektrální analýza olejů

4 Edwards

4.1 Představení společnosti Edwards

Společnost Edwards je přední světový výrobce vakuových zařízení, který nabízí široké portfolio výrobků pro různá odvětví využití, od polovodičového průmyslu přes vědecké použití, metalurgické zpracování, až po potravinářství či farmacii. Společnost založil v Anglii roku 1919 pan Frederick David Edwards za účelem obchodu s vakuovou technikou. A současné době najdeme její výrobní, vývojová a servisní střediska po celém světě. Pokud se zaměříme na působení v České republice, tak první zmínky pocházejí z roku 1999, kdy byla dceřiná společnost se sídlem v Lutíně u Olomouce. Kde je dnes jeden z největších výrobních podniků v rámci celé skupiny společnosti. V roce 2006 byla založena druhá dceřiná společnost Edwards Services, s. r. o se sídlem v Brně. Tato společnost byla vytvořena jako servisní centrum pro rozšíření služeb zákazníkům v údržbě vakuových zařízení. V roce 2009 se servisní činnosti přidali finanční služby a přidružené obory. Tím byl položen základ k vytvoření centra sdílených služeb z jednotlivých poboček s centralizací v Brně. Servisní

středisko Edwards services, změnilo v roce 2018 obchodní název na Atlas Copco Services, a tím došlo k přechodu pod větší celosvětově působící společnost Atlas Copco.

4.2 Portfolio vakuových produktů na servisním středisku

Brněnské servisní centrum poskytuje opravárenské služby pro zákazníky především z evropských zemí. Portfolio servisovaných vakuových zařízení je jedno z nejširších v možném rozsahu vyráběných vývěv. Můžeme zde nalézt vakuové zařízení řady IQ, kdy počátek výroby této řady sahá k roku 1984, přes postupně vyvíjené, vyráběné a modernizované řady vývěv až po nejnovější turbomolekulární vývěvy z řady nEXT. Početně největší skupina servisovaných vakuových zařízení patří do polovodičového průmyslu. V rámci toho průmyslu můžeme do skupiny zařadit tyto typy vývěv – Rootsovy vývěvy, vícestupňové claw vývěvy, šroubové vývěvy a scroll vývěvy.



Obrázek 4.1 – Společnosti využívající vakuové vývěvy Edwards

Zdroj: <https://www.careermarket.cz/web/share/dff/Edwards.pdf>

4.3 Vývěvy z produktové řady IQ

Vývěvy z produktové řady IQ jsou jedny z nejstarších dodnes využívaných vakuových vývěv. V roce 1984 si společnost Edwards nechala patentovat řešení suché vakuové vývěvy, která v sobě přinesla technologický krok dopředu. Suchá vývěva spočívá v technickém řešení vícestupňových pracovních komor vývěvy tak, že odčerpávaný plyn nepřichází do kontaktu s žádným mazacím prostředkem, kterým by se mohl kontaminovat. Vakuové vývěvy řady IQ se vyráběly ve více variantách provedení. Pokud zákazník požadoval vývěvu

do průmyslových podmínek, mohlo mu být nabídnuto provedení pro industrial. Tento typ vývěv byl poháněn s vzduchem chlazeným elektromotorem. Jako další varianta byla možnost mít elektromotor s vodním chlazením, který se hojně využíval pro použití v polovodičovém průmyslu.



**Obrázek 4.2 – Vývěva GV 80
s vzduchem chlazeným motorem**

Zdroj: <https://www.ibericavacuum.com/pages/gv80>



**Obrázek 4.3 – Booster QMB 500
s vodou chlazeným motorem**

Zdroj: <http://www.ptbsales.com/edwards-qmb-500-vacuum-blowers/>

Vývěvu lze provozovat v základních dvou sestavách. Bud je možno používat k odčerpávání plynu pumpu jako samostatné zařízení nebo použít kombinaci pumpy a pomocné vývěvy – boosteru. Využití boosteru v kombinaci s pumpou získáme systém vakuové aparatury, který je v porovnání oproti použití samotné pumpy výkonnější pro potřeby zákazníka.



Obrázek 4.4 – Sestava vakuových vývěv – pumpa IQDP80 a booster QMB250

Zdroj: <http://richztec.com/product/edwards-iqdp80-qmb250/>

4.4 Diagnostika vývěv

Pokud vývěva je ve stavu, kdy již není schopna z jakéhokoliv důvodu spolehlivého provozu, je nutné tento stroj odpojit z pracovního cyklu a provést diagnostiku. Na základě diagnostikované poruchy lze provést její opravu na servisním pracovišti přímo u zákazníka. Jestliže porucha vývěvy má znaky složitějšího charakteru, kdy obsluha zařízení není schopna blíže nezjištěnou poruchu opravit. Je tato vývěva odeslána na opravu do servisního centra a zároveň je poskytnuta obecná informace o stavu vývěvy, popřípadě informace, proč byla vývěva vyřazena z pracovního zapojení.

4.5 Průběh operací na servisním středisku

Aby vývěva mohla být opravena v servisním středisku, je nutné splnit bezpečnostní opatření, tak aby nehrozilo nebezpečí kontaminace do okolí. Vakuové vývěvy mohou pracovat s plyny, které vznikají jako vedlejší produkty při hlavním pracovním procesu u zákazníka a jsou lidskému zdraví a přírodnímu okolí nebezpečné. Z toho důvodu musí zákazníci vakuovou vývěvu připravit pro bezpečný převoz. Jedná se především o stabilní ustavení do přepravního boxu, bezpečné zaslepení odmontovatelnými kryty sací a výfukový otvor a přiložení provozní dokumentace o stavu a kontaminaci vývěvy.

Takto přepravovaná vývěva je doručena na příjem logistického oddělení, kde je pracovníky skladu rozbalena, zaevidovaná na příjem, vyfocena z důvodu bližší identifikace a stavu v jakém byla doručena včetně doručeného příslušenství a posléze je uložena do skladových prostor.

Na základě servisní smlouvy, kterou má každý zákazník uzavřenou individuálně, lze dále s vývěvou pracovat. Může nastat situace, že zákazník doručí poškozenou vývěvu do servisního střediska a obratem mu bude odeslána vývěva stejného typu a konfigurace. Nebo bude vývěva celkově repasovaná a zákazníkovi doručena ta samá v plně funkčním stavu.

První krokem, kdy vývěva vstupuje do procesu opravy je příprava vývěvy na pracovišti Decon, kde se odeberou provozní kapaliny. Jedná se o vypuštění okruhu s chladicí kapalinou a odsátí olejových náplní z pracovních komor. Posléze je vývěva přemístěna demontážní linku. Tady se postupně odmontovávají vnější součásti a příslušenství, jedná se převážně o elektroniku. Toto demontované příslušenství je uloženo do přepravní skříně a opět bude

použito při skládání, pokud nebyly některé komponenty poškozené, nebo nezpůsobovali poruchu v provozu vývěvy. Posléze se dále postupuje do jednotlivých zařízení vakuové sestavy, která se skládá z pomocné vakuové vývěvy – boosteru a hlavní vakuové pumpy. Zařízení jsou demontována do jednotlivých samostatných součástek. Jednotlivé komponenty jsou postoupeny na další pracoviště, kde probíhá jejich očista v podobě o tryskání pískovacím strojem s manuální obsluhou. Na dalším pracovišti jsou komponenty ponořeny do antikorozi ochranné lázně, tak aby se ochránily před možnou korozí. Všechny součásti jsou dále ofukovány stlačeným vzduchem tak aby mohli být předány na inspekční pracoviště již v bezvadném stavu. Na pracovišti inspekce jsou ověřovány vybrané klíčové parametry jednotlivých komponent, metrologickými nástroji a přístroji. Tak aby se zajistilo, že komponenty neodpovídající tolerancím, nebo nadměrně opotřebené díly již nemohly být znovu zastavěny v repasované vývěvě. Po inspekci se vyřazené komponenty nahradí novými. A rozložená vývěva se přesouvá z pracoviště Decon na pracoviště Build. Na tomto místě se vývěva znovu seskládá do provozního stavu. Pracovníci, kteří vývěvu sestavují podle přesně daných směrnic a instrukcí, musí používat ochranné rukavice, aby se zajistilo, že tělesný pot na ruku nebude inicializovat povrchovou korozi na manipulovatelných dílcích, s kterými přijdou do kontaktu při stavbě, nastavování a ověřování funkčních parametrů. Pokud je vývěva správně složená závěrem se ověří na pracovišti Build, zdali je, její klíčová vlastnost v pořádku. Proveďte se zkouška na těsnost vývěvy. Zkouška probíhá tak, že se připevní zaslepující zátka na výfukový otvor a na sací otvor se přidělá příruba s přechodem na sací vedení k heliovému detektoru úniku. Pomocnou vývěvou v heliovém detektoru se vytvoří v pracovní komoře vývěvy vakuum a vývěva se přikryje obalem, tak aby byl zajištěn malý uzavřený prostor s testovanou vývěvou. Do tohoto prostoru se posléze aplikuje z tlakové láhve přiměřené množství plynného helia a kontroluje se stav na heliovém detektoru úniku. Pokud detektor udržuje stále stejnou hranici vakuu, znamená to, že test je úspěšný a testovaná vývěva je bez závady v těsnosti. Pokud po aplikaci plynného helia dojde k zaregistrování helia v systému pracovní komory testované vývěvy, znamená to, že někde dochází k přísávání a vývěva musí opravena. Po úspěšném testu se vývěva přesouvá do lakovny, kde je proběhne aplikace ochranného laku nástřikem. Na dalším pracovišti s označením System si vývěvu přebírají pracovníci, kteří provedou prvotně usazení do pracovního rámu, poté kompletaci rozváděcích potrubí chladiva, plynu, elektrifikace. Na skládanou vývěvu jsou doplněny komponenty, které nejsou v kontaktu s kontaminovaným pracovním prostředím a byly demontovány na vstupu pracoviště Decon. Pokud jsou instalační operace na pracovišti System dokončeny, jde znovu vývěva na zkoušku k detektoru úniku a ověří se celý systém vakuové sestavy. Ta může být sestavena, tak jak je

uvedeno na obrázku 3.4. Systém vývěv smontovaný v kombinaci pumpy a boosteru je dále přesunut na pracoviště Testing. Zde se vývěvy naplní provozními kapalinami a dojde k jejich prvotnímu spuštění, záběhu a výkonovým ověření parametrů, které musí splňovat, tak jak je deklarováno zákazníkům. Pokud vývěva nesplňuje požadované parametry, provede se vyhodnocení inspekčních záznamů a dojde k nápravě. To znamená, že se vývěva musí demontovat a vybrané díly vyměnit za nové. Po testech se vývěva přesouvá na prostor finální kontroly, doplní se boční oplechování, doplní se výstražné symboly označující například body pro manipulaci s jeřábem, signalizační symboly, a podobně. Poté se vývěva přesouvá na poslední pracoviště do oddělení balení. Zde se vývěva zabalí prvně do antikoroziního ochranného obalu, který je hermeticky uzavřený. A na závěr je uložena do přepravního boxu. Takto připravená vývěva může být umístěna do skladových prostor nebo je expedována k zákazníkovi.

5 Současný stav a rozbor provedených diagnostických měření

Rozbor úniku oleje ze spojkové skříně bude demonstrován na vybraném typu vakuové vývěvy. Jedná se o vakuovou vývěvu pracující na principu Rootsových rotorů, která slouží jako podpurná vývěva k dosažení vyššího stupně vakua. Takový to typ vývěv se dodává zákazníkům, kteří požadují využití vývěv v polovodičovém průmyslu. Sestava se skládá z iQMB podpurné vývěvy a hlavní vývěvy iQDP. Vývěvy se mohou dodávat v různých výkonových parametrech a kombinací. Ovšem mechanické jádro konstrukce zůstává stejné. Základní sestava popisovaného uspořádání lze vidět na **Obrázku 4.4 – Sestava vakuových vývěv.**

5.1 Vracené kusy na opravu

Z vybraných dat, které máme k dispozici známe druhy poruch, které se na zařízení objevily a byly zaznamenány od zákazníka s požadavkem na opravu. A jejich bližší specifikace o závadách není známa. Data jsou z období let 2015 až 2018. Poruchy na zařízení nejsou pouze mechanické, ale značná část je i v elektrických obvodech. Evidence závad má přinést informace o tom, které pumpy, a s jakými závadami byly vráceny s požadavkem na opravu během jejich pracovního cyklu v období, kdy se na ně ještě vztahovala záruka.

Tabulka 4 – Přehled obecně specifikovaných vad k opravě (11)

<i>Pump type</i>	<i>Investigated defect</i>	<i>General</i>	<i>Frequency</i>
iQ 80/1200 iQ 80/250 iQ 80/500	oil issue	únik oleje	7
	poor ultimate base pressure	problémy s tlakem	6
	pump blocked during the process	nepohyblivá vývěva	5
	Alarme DP power high	elektrický problém	12
	product noisy	hluk	3
	Pump doesn't start, no answer on PDM	ostatní selhaní	12

5.2 Specifikace problému

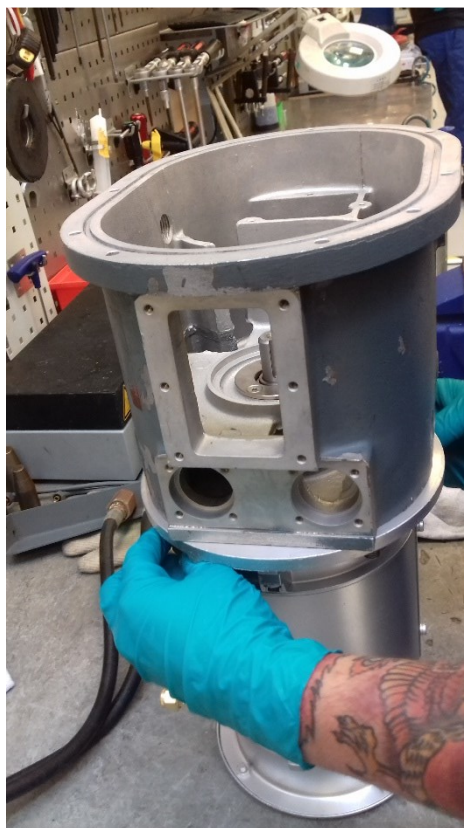
Bližší specifikací problému bylo zjištěno při demontážích vakuových vývěv řady iQMB, že je spojitost mezi hlášenými úniky oleje a nalézáním vydřené drážky na kroužcích, které jsou nasunuty a podlepeny na hnací hřídeli od elektromotoru. Tento konec hřídele má vyústění ve spojkové skříní, kde je na něm umístěn jeden kotouč hydrodynamické spojky. Hřídel je osazena dvěma kuličkovými ložisky, které jsou umístěny na jednom kraji a přibližně uprostřed hřídele, v přírubě statoru elektromotoru, letmý konec hřídele dále vede přes zásobníkovou komoru olejové náplně spojkové skříně až do hlavní komory hydrodynamické spojky.



Obrázek 5.1 – Vyobrazení hnací hřídele elektromotoru (11)

Na letmý konec hřídele jsou dále doplněny 2 ocelové kroužky, které jsou na hřídeli zajištěny proti axiálnímu a rotačnímu pohybu vůči hřídeli lepidlem. Tyto ocelové kroužky jsou posléze v kontaktu s kontaktním hřídelovým těsněním v podobě gufer. Olejový zásobník

prostor je chráněn od příruby elektromotoru jedním guferem. A další dvě gufera od sebe oddělují prostor hlavní spojkové skříně a zásobní olejové komory před elektromotorem.



Obrázek 5.2 – Pohled na sestavu elektromotoru se spojkovou skříní (11)

5.3 Posudek č. 1 – Ložiska rotoru elektromotoru

Aby se vyloučilo podezření, že vada může být způsobena ložisky, ať již novými od dodavatele nebo při projevení vady ložiska za provozu. Byl odebrán jeden pár ložisek z usazení na rotoru elektromotoru. Obě ložiska jsou identická a jedná se o typ 6205-C-2Z-C3. Ložiska jsou nerozebíratelná jednořadá radiální s ocelovou klecí vedenou kuličkami s oboustrannými bezdotykovými těsněními. Ložiska svými vlastnostmi odpovídají charakteru použití a jsou vhodná pro použití například s rotory elektromotorů.

Pro bližší analýzu použitých a demontovaných ložisek byl vypracován odborný posudek od renomovaného výrobce ložisek sídlícího v Brně. Rozbor ložisek byl vypracován v oddělení výzkumu a vývoje. Prvně byl hodnocen vizuální vzhled. Bylo konstatováno, že na vnějších válcových kroužcích ložisek se nacházejí četné stopy stykové koroze a na jednom ložisku je patrné z čelní strany nepravidelné oleštění. Nález stykové koroze na úložných plochách ložisek není nijak neobvyklý a nemá vliv na jejich chod (11).



Obrázek 5.3 – Kuličkové ložisko typu 6205-C-2Z-C3

Zdroj: <https://www.industrial.cz/kategorie/produkty/loziska/kulickova-Loziska/jednorada-kulickova-loziska/> a <https://cz.rs-online.com/web/p/kulickova-loziska/1371661/>

Dalším měřením byla provedena kontrola hladiny vibrací. Naměřené hodnoty splňovaly kritérium pro maximální mez povolené hodnoty u nového nepoužitého ložiska.

Pro další zkušební měření již ložiska musela být rozebrána na jednotlivé komponenty. Byla provedena kontrola geometrie na pracovních plochách válcových kroužků a kuliček. Naměřené hodnoty byly porovnány s dovolenými hodnotami z podnikových norem pro jednotlivé komponenty ložiska. Výsledky byly v souladu s dovolenými hodnotami z PN.

Závěrem kontrolní zprávy bylo shrnutí, o stavu ložiskových komponent, kde nebylo zjištěno žádné poškození ložisek až na stykovou korozi vnějších kroužků. Ložiska by byla schopna dalšího provozu bez omezení (11).

Pro vyhodnocení stavu ložisek byly použity tyto normy:

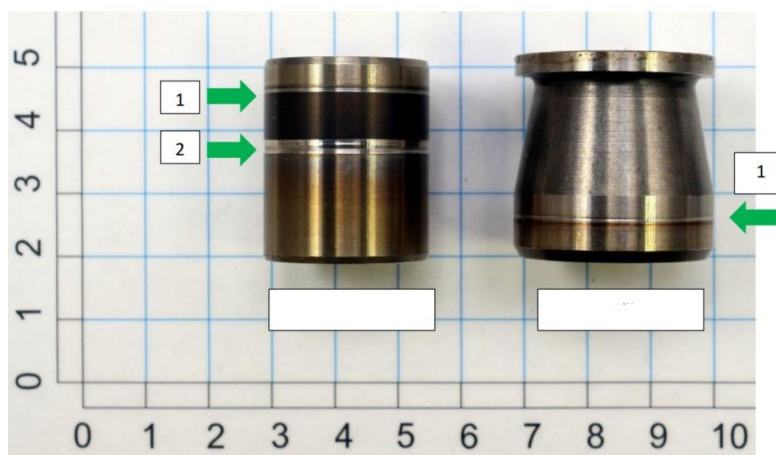
- | | |
|--|--------------|
| - Kuličky | ČSN ISO 3290 |
| - Úchytky kruhovitosti pracovních ploch valivých ložisek | PN 1 0220-1 |
| - Hladina vibrací radiálních ložisek | PN 1 0221 |

5.4 Posudek č. 2 – Analýza hřídelových pouzder

Na základě hypotézy o kvalitě dodávaného sortimentu od subdodavatele se provedlo kontrolní měření vybraných parametrů hřídelových pouzder. Tyto pouzdra jsou vkládána při montáži sestavy vakuové vývěvy na hřídel elektromotoru. Jejich nehybné ustavení na hřídeli je zajištěno lepidlem. Z dostupné výrobní dokumentace vyplívá, že při montáži nemůže nikdy dojít k přesahu mezi pouzdrem a hřídelí, ale právě pouzdro je na hřídeli vždy uloženo s vůlí. Minimální vůle může být 0,002 mm. V případě použití maximálního průměru hřídele a minimálního průměru otvoru pouzdra. Naopak maximální vůle v uložení může být 0,031 mm (11).

Analýzu hřídelových pouzder prováděla výzkumná skupina pracující v Laboratoři materiálových analýz a spolupráce s průmyslem, působící pod strojní vysokou školou.

Analýza byla cíleně zaměřena na ověření tvrdosti povrchu hřídelových pouzder, neboť právě v nich docházelo k tvorbě drážek vzniklých z opotřebení ze styku od bříty těsnícího hřídelového kroužku.



Obrázek 5.4 – Hřídelová pouzdra s vyznačenými místy opotřebení (11)

Nejdříve bylo nutné připravit vzorky na metalurgické zkoušky tak, aby se dala ověřit tvrdost vzorku dle výrobní dokumentace, která říká, že v hloubce 0,3 mm pod povrchem součásti má být tvrdost v rozmezí 55–60 HRC, to znamená v přepočtu na hodnoty dle Vickerse, 600 – 700 HV.

Měření tvrdosti bylo provedeno metodou dle Vickerse. Dle zkušební metody z normy ČSN EN ISO 6507-1 (11). Měření se provádělo na příčných řezech z hřídelových pouzder.

Měření bylo provedeno na obou vzorcích ve dvou řadách, tak aby se výsledky z prvního měření mohly druhým měřením potvrdit. Rozdíl získaných hodnot při měření řady 1 a řady 2 v jednotlivých krocích hloubky měření nebyl vyšší jak 10 %. Požadovaný rozsah tvrdosti v definované hloubce byl splněn (11).

Na základě výsledků získaných z měření lze potvrdit, že vzorky poskytnuté ke zkoumání splňují požadavky předepsané výrobní výkresovou dokumentací. Povrchová struktura materiálu odpovídá použitému tepelnému zpracování cementace a martenzitické struktuře.

Závěrem bylo doporučeno:

- Na sestavě pouzdra a gufera ověřit skutečné výrobní rozměry a tolerance předepsané výkresovou dokumentací.
- Pro zvýšení provozní spolehlivosti zvýšit hodnotu tvrdosti v požadované hloubce dle výkresové dokumentace na tvrdost 58–62 HRC (cca 650–750 HV).

5.5 Posudek č. 3 – Funkční testování vakuové sestavy

Závěrečný posudek se zabývá reálným testováním provozu vakuové vývěvy v servisním středisku se zaměřením na sledování stavu opotřebení hřídelových pouzder a zjištění funkčních parametrů při jakých stroj pracuje. Projekt byl rozdělen na několik fází, tak aby posloupnost kroků mohla přinést odpovědi a výsledky na položené hypotézy a otázky.

V první fázi bylo nutné definovat, jaký je problém a co s sebou přináší. Bylo stanoveno, že jde o vyšetření příčin úniku oleje u podpůrných vývěv (boosterů) produktové řady iQMB. S tím, že toto selhání s sebou přináší náklady na opravy a s tím spojené zvýšené množství reklamačních řízení. Vyřešení projektu by mělo mít za cíl, snížení nákladů na opravy, nejlépe dosáhnout výsledku, kdy nebude vrácená žádná vývěva v rámci reklamace. Roční počet reklamovaných vývěv se pohybuje v jednotkách kusů, ovšem finanční náklady na opravy se promítnou v přepočtu jako statisíce korun českých.

Jako další fáze se provedlo testování a měření. Na základě měřicího plánu byla připravena tabulka kritických míst, které se budou sledovat a zaznamenávat data získaná z měřících senzorů.

Tabulka 5 – Měřicí plán (11)

<i>Provedení pokusu</i>	<i>Sledovaná oblast</i>	<i>Parametr</i>	<i>Interval záznamu</i>	<i>Provedení záznamu</i>	<i>Měřidlo</i>
experiment	Příruba	Teplota	30 min.	tabulka	Pyrometr Optris
experiment	Hřídel	Teplota	30 min.	tabulka	Pyrometr Optris
experiment	Olej	Teplota	30 min.	tabulka	Teplotní sonda
experiment	Spojka	Tlak	30 min.	tabulka	Manometr
experiment	Gufero	Tlak	30 min.	tabulka	Manometr
experiment	Únik oleje	Vizuální projev	30 min.	tabulka	Vizuální kontrola
Výběr materiálu	Ložiska	životnost/ geometrie	N/A	Posudek č. 1	Report od subdodavatele
Výběr materiálu	Gufero	Materiál	N/A	Prezentace	Specifikace materiálu
Výběr materiálu	Olej	Viskozita	N/A	Prezentace	Specifikace materiálu
Výběr materiálu	Lepidlo	Materiál	N/A	Prezentace	Specifikace materiálu
Výběr materiálu	Hř. pouzdro	Tvrdost	N/A	Posudek č. 2	Report od subdodavatele
Vizuálně	Provoz vývěvy	Únik oleje	N/A	Prezentace	Pozorování

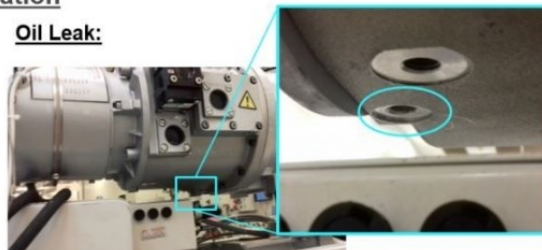
Testovací měření bylo provedeno na 4 konfiguracích jednoho typu vakuové vývěvy. Test se prováděl po dobu běžné pracovní směny (7,5 h. denně) a posléze přerušen. S pokračováním v dalším dni. Hodnoty z měřících senzorů byly zaznamenány do kontrolní tabulky každých 30 minut. Byl použit tlakový omezovač pro simulaci běžných testovacích podmínek dle standartních výkonostních testů.

Measurement points: Standart configuration

Temperature:



Oil Leak:



Pressure: Coupling

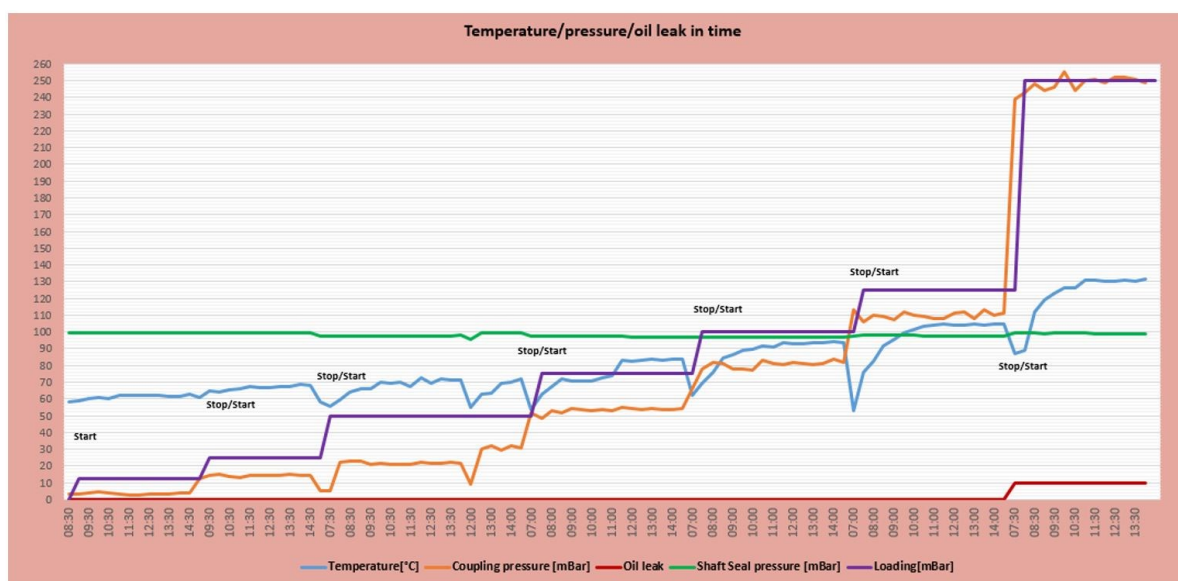


Pressure: Shaft Seal



Obrázek 5.5 – Fotografie vybraných kontrolních míst se senzory (11)

Záznamem dat vznikla tabulka hodnot závislosti tlaku na čase, v které jsou zobrazeny parametry teploty, tlaku ve spojkové komoře, únik oleje, tlak v zásobní komoře, tlakové zatížení na výstupu vývěvy.



Obrázek 5.6 – Graf závislosti tlaku na čase zaznamenávaných veličin (11)

Základní zkušební zatížení pro daný typ vývěvy je výstupní tlak o hodnotě 12 mbar. Průběh testování se začal jevit jako zajímavý ve chvíli, kdy byla vývěva zatížena 20krát více, než je běžná provozní hodnota, tedy při dosažení hodnoty 250 mbar, avšak již hodnota tlaku 120 mbar je kritické přetížení pro komponenty vývěvy. Při tomto maximálním testovaném přetížení se projevil únik oleje ze sledovaného prostoru (11).

Ze získaných dat vzniklo několik hypotéz, které se dále podložili výsledky. A to například.

Bod 1 - Tlak v zásobní komoře, z které byl posléze zpozorován únik oleje, není ovlivňován zatížením ani teplotou.

Bod 2 - Vliv závislosti teploty příruby a zatížení má charakter lineární přímky, s Pearsonovým korelačním koeficientem 0,98.

Bod 3 - Vliv závislosti zatížení na tlaku ve spojkové komoře má charakter lineární přímky, s Pearsonovým korelačním koeficientem 0,99.

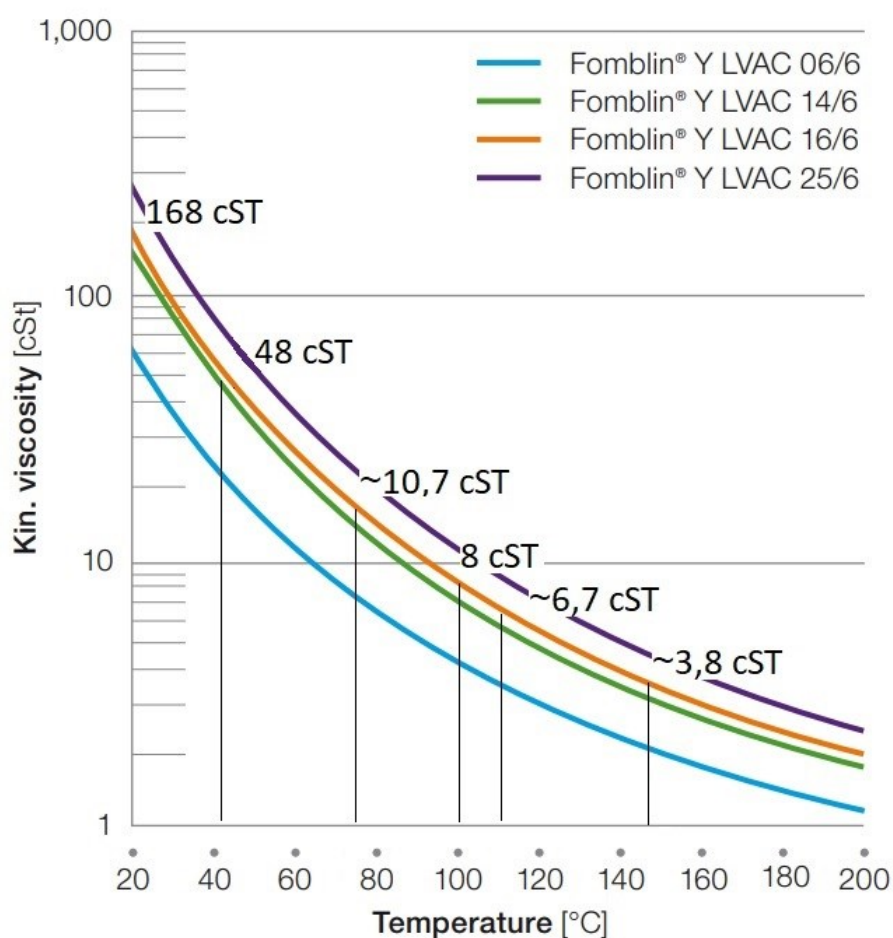
Bod 4 - Vliv závislosti teploty oleje na zatížení má charakter lineární přímky, s Pearsonovým korelačním koeficientem 0,98.

Bod 5 - Vliv závislosti teploty oleje na teplotu příruby má charakter lineární přímky, s Pearsonovým korelačním koeficientem 0,99.

Pearsonův korelační koeficient je číslo, které signalizuje vliv lineární charakteristiky závislosti hodnot vynesných v grafu na osách x, y. Může nabývat hodnot z intervalu $\langle -1,1 \rangle$. Kladné hodnoty blíží se jedničce dosahuje, když získané hodnoty z osy x mají lineární souvislost s hodnotami na ose y.

V navazující fázi se z dosažených výsledků provedlo vyhodnocení. Získanými daty z měření, v souvislosti ve spojení na závislosti dle bodu 4. Lze uvést, že během testování bylo dosaženo tlaku 200 mbar a 250 mbar teplot olejové náplně 131 °C a 145 °C. Při porovnání materiálových vlastností gufera, na základě tohoto teplotního zatížení. Dochází ke změnám v chování materiálu. Pevnost v tahu se zvyšuje z 3,5 MPa na 5,8 MPa. Délkové prodloužení se sníží z 300 % původní hodnoty na 200 %. Na základě těchto skutečností, lze konstatovat, že vystavením gufera vyšším teplotám dojde ke změně jeho vlastností a to tak, že sice zvýší svoji pevnost, ale naopak ztrácí svoji elasticitu. A posléze může docházet k únikům oleje, ve spojení s vydíráním hřídelového pouzdra (11).

Při porovnání hodnot teploty oleje v závislosti na zatížení, je vidět, že se vzrůstající zátěží stoupá i teplota oleje. Z toho může konstatovat, že při běžné provozní zátěži 125 mBar se teplota oleje pohybuje okolo 76 °C, při teplotě okolního prostředí, při této teplotě je kinematická viskozita oleje 45 cSt = mm²/s. Teplota oleje dále může být ovlivněna právě prostředím, v kterém se vakuové systémy nacházejí. Na základě rozmístění a četnosti vakuových vývěv u zákazníků se vývěvy mohou nacházet jak v prostředí s velice chladnou okolní atmosférou, tak právě i naopak v prostředí, kde není zajištěna cirkulace vzduchu a vlivem provozu strojních zařízení dochází ke značnému ohřátí okolního prostředí.



Obrázek 5.7 – Graf závislosti Kinematické viskozity na teplotě

Zdroj: https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-10/Fomblin-PFPE-Lubes-for-Vaccum-Applications_EN-v2.7_0.pdf

Tabulka 6 – Vliv teploty oleje na kinematickou viskozitu oleje (autor)

teplota oleje [°C]	kinematická viskozita [cST]	vakuum na vývěvě [mBar]	Komentář
20	168	-	Teplota okolní atmosféry
40	48	-	Zkušební teplota kin. viskozity dle ČSN ISO 3104
76	10,7	12,5	Provozní zatížení, běžný stav
100	8	-	Zkušební teplota kin. viskozity dle ČSN ISO 3104
109	6,7	125	10 násobné přetížení
145	3,8	250	20 násobné přetížení

Při přetížení vakuové vývěvy na 10 násobné provozní zatížení dojde ke snížení kinematické viskozity o 30% hodnoty vůči provoznímu stavu. Pokud je vývěva zatížena 20 násobným zatížením, kinematická viskozita se sníží přibližně o 60% z provozní hodnoty kinematické viskozity.

V závěru projektu bylo shrnutí dosažených výsledků a návrh na další postup možného řešení. Bylo zjištěno, že únik oleje má spojitost s vydřením drážky hřídelového pouzdra od gufera. Při demontážích vakuových vývěv, v zásobní komoře mezi spojkovou skříní a přírubou k elektromotoru, bylo možné objevit usazeniny mající charakter ocelo-práškových zákalů. Zvýšené teplo způsobené vyšší zátěží vakuové vývěvy přehřívá olej vůči běžné provozní teplotě a to má za důsledek změnu materiálových vlastností gufera a zároveň zvýšené teplo značně ovlivňuje míru kinematické viskozity v neprospěch provozních parametrů.

Na základě těchto závěrů bylo usneseno, že se problematika úniku oleje dále zaměří na identifikaci a analýzu olejové náplně ve vývěvě. Tvorba drážky může mít také spojitost s kontaminací abrazivními elementy olejové náplně od tryskání v pískovacím stroji při očištění v servisním středisku, popřípadě jako usazenina formovací směsi při výrobě dílu odléváním. Vizuální stav olejových náplní některých vakuových vývěv doručených k servisu se jevil značně odlišně, podezření na kontaminaci olejové náplně (11).

6 Navrhovaný postup analýzy tribotechnické diagnostiky

Na základě výsledků získaných provozním testováním byl požadavek na tribodiagnostickou analýzu olejové náplně vakuových vývěv. Byly odebrány olejové vzorky ze 7 různých vakuových vývěv stejného typu s různou délkou použití v provozu. Analyzován byl také referenční olejový vzorek, který byl odebrán z čistého originálního balení. Olejové vzorky byly podrobeny tribodiagnostickým zkouškám, které jsem vybral jako nejvíce vhodné ukazatele stavu olejové náplně pro diagnostikování a jsou uvedené v tabulce 7.

Tabulka 7 – Použité tribodiagnostické zkoušky

Zdroj: <http://interdiago.vsb.cz/kom/index.php?pageid=0&parent=5>

Název zkoušky	Jednotka	Norma
Kinematická viskozita při 40 °C a 100 °C	mm ² /s	ČSN EN ISO 3104
Kód čistoty mikroskopicky	třída	ČSN ISO 4406, NAS 1638
Prvková analýza XRF	ppm (mg/kg)	Metodika
IČ spektrometrie	-	metodika

6.1 Charakteristika olejové náplně

Ve vakuové vývěvě řady iQMB se primárně používá olej s obchodním označením Fomblin® Y VAC 16/6. Jako alternativu lze použít olej s označením Krytox® 1514. Fomblin je PFPE olej výrobcem vakuové vývěvy doporučován k použití k mechanickým vývěvám typu s Rootsovými rotory.

Fomblin je syntetický polyetherový chemicky inertní olej. Přítomnost fluoru poskytuje tepelnou, chemickou a oxidační stabilitu. Vzhledem k inertním vlastnostem poskytuje Fomblin vysokou kompatibilitu s plasty, kovy a elastomery. Má nízkou mísitelnost s rozpouštědly a vodou. Má nízký tlak par, 0,001 mBar při 100 °C.

Na základě svých vlastností neaktivní s většinou korozivních par. Odolává vysokým teplotám a procesům s působením kyslíku. Má široký teplotního rozsah využití, od -100 °C až do 200 °C. Jeho použití je vhodné pro aplikace v polovodičovém průmyslu, tak i pro aplikace zahrnující extrémní provozní podmínky. Jakožto čerpání kyslíku a dalších oxidantů, odsávání zplodin při leptání plazmou nebo leptání reaktivních iontů. Obecně vhodný pro použití v agresivním chemickém prostředí s vysokou teplotou nebo v prostředí se širokým teplotním rozpětí (12).

6.2 Metodika odběru vzorku

Odběr vzorků byl proveden na základě pokynů převzatých z normy upravující postup odběru vzorků pro stanovení obsahu mechanických nečistot, dle ČSN 65 6207 (8).

Olejové vzorky se odebíraly ze zásobní komory, kde dle návodu k použití od výrobce se doporučuje naplnit prostor na základě vyznačených rysek, což znamená objem olejové náplně přibližně 130 ml. Vzorky byly odebírány jednou osobou, vždy za stejných podmínek, po uvedení a setrvání vývěv do provozního režimu, tak aby se dosáhlo objektivního složení a pracovní teploty. Potřebný čas byl minimálně 20 minut. Odběry byly provedeny do čistých vzorkovnic, o objemu 300 ml, v maximálním možném množství odebraného oleje ze zásobní komory. Následně byly vzorkovnice označeny všemi dostupnými informacemi, které byly k dispozici. Místa odběru byly vždy stejná, druh olejové náplně byl shodný se všemi vzorky. Vzorkovnice byly označeny unikátními kódy, tak aby byla jednoznačná identifikace olejové náplně k dané vakuové vývěvě. Na zařízeních, kde jsme znali dobu provozu, byla tato informace doplněna v podobě počtu moto hodin. Vzorky jsem pak poskytl ke zkouškám.

6.3 Zkoušky čistoty vzorků

Celkové znečištění řadíme mezi smluvní zkoušky a vyjádření výsledků lze podat více způsoby, záleží na způsobu použité měřící metody. Metody umožňují vyhodnotit celkové znečištění mechanickými nečistotami a zplodinami termooxidačních reakcí. Hydraulické obvody vyžadují nejvyšší čistotu provozních kapalin. Zdroje znečištění mohou být nečistoty:

- **Primární** – nečistoty nádrže, potrubí. Typické pro tento druh nečistot jsou otřepy, písky, prach, barvy, okuje, ředidla a vlákna z čisticích prostředků
- **Z okolí** – nečistoty vniklé dovnitř soustavy z okolí po povrchu pístnice, nebo nedostatečně uzavřeným plnicím otvorem, jako prach, písek, mikroorganismy
- **Vzniklé z obvodu** – cirkulace hydraulické kapaliny, produkty koroze, eroze a opotřebení
- **Vzniklé z hydraulické kapaliny** – nečistoty vzniklé samovolným vypadnutím aditiv z oleje (detergeny, protioděrové přísady, antioxidanty), interakcí aditiv.

Největší nebezpečí pro hydraulické obvody mohou způsobit pevné nečistoty. Pohybují se velkou rychlostí v potrubí a mohou způsobit erozivní opotřebení. Dále mohou částice

způsobit ucpání štěrbin a vznikat kavitační opotřebení. Částice se také mohou stát abrazivními elementy a mohou způsobit zadírání hydraulických prvků.

V souvislosti s těmito druhy poškození se může zaměřit na zkoumání problematiky a to tak, že se budeme bavit o pojmech (8):

- Celkové znečištění
- Mechanické nečistoty
- Kód čistoty



Obrázek 6.1 – Podtlaková sestava s filtrací olejového vzorku přes membránový filtr s velikostí pórů 0,85 μm (autor)

6.3.1 Stanovení třídy čistoty – NAS 1638

Jedná se o americkou metodu pro klasifikaci čistoty hydraulických kapalin. Olejový vzorek o objemu 100 ml je přefiltrován přes membránový filtr a posléze jsou zachycené částice vyhodnoceny pod mikroskopem. Třída čistoty je vzorku přiřazena na základě obsahu množství a velikosti částic. Rozlišujeme 12 tříd čistoty v rozsahu tříd – 1, 2 až po 12 (7).

6.3.2 Stanovení kódu čistoty – ISO 4406

Principem metody je stanovení počtu nečistot. Kód čistoty se skládá ze 3 čísel, kdy první z nich udává obsah nečistot ve zkoušené kapalině o objemu 25 ml větších jak 4 μm , druhé číslo nese informaci o obsahu nečistot větších než 6 μm a třetí číslo označuje velikost částic větších než 14 μm v přepočtu na 1 ml zkušebního olejového vzorku dle normy ISO 4406/99. Jednotlivé kódy čistoty jsou vzorku přiřazeny na základě obsahu a velikosti části ve vzorku. Jde o metodu kódování úrovně znečištění kapaliny pevnými částicemi, vyhodnocení může být stanovením počtu částic mikroskopicky nebo automatickým počítačem nečistot.

Výsledky automatizovaného stanovení třídy čistoty	Výsledky automatizovaného stanovení třídy čistoty
Operátor: Označení vzorku: Hemala 301 846 949 Objem vzorku: 25,0 ml Datum pos. snímání: 16.11.2018 13:50:58 Datum pos. analýzy: 16.11.2018 13:51:33 Počet snímků: 50 plánovaných / 50 sejmutých / 50 analyzovaných Podíl analyzované plochy: 1,1 % Počet částic na 100% plochy a 1,0 ml > 4 μm : 4570 > 6 μm : 2694 > 14 μm : 634 Výsledná třída čistoty odpovídající ISO4406:1999 Třída: 19/19/16 Lambdasoft 2007 (c) Diram s.r.o., www.diram.cz Dne 16.11.2018 13:52:50	Operátor: Označení vzorku: Hemala 301 846 949 Objem vzorku: 25,0 ml Datum pos. snímání: 16.11.2018 13:50:58 Datum pos. analýzy: 16.11.2018 13:51:33 Počet snímků: 50 plánovaných / 50 sejmutých / 50 analyzovaných Podíl analyzované plochy: 1,1 % Počet částic na 100% plochy a 100,0 ml > 5, <= 15 μm : 289690 > 15, <= 25 μm : 32952 > 25, <= 50 μm : 18106 > 50, <= 100 μm : 4707 > 100 μm : 1448 Výsledná třída čistoty odpovídající NAS1638 Třída: >12 Lambdasoft 2007 (c) Diram s.r.o., www.diram.cz Dne 16.11.2018 13:52:40



Obrázek 6.2 – Vzor výsledků z měření – kódu čistoty, třídy čistoty a ukázka membránového filtru po filtraci olejového vzorku (autor)

6.4 Infračervená spektrometrie

Měření bylo provedeno na přístroji Nicolet – Impact 410. Přístroj využívá infračervenou spektrometrii s Fourierovou transformací, tato metoda se zabývá analýzou absorpčních spekter molekul, absorbujících záření o vlnových délkách v rozsahu λ , 80 nm – 100 μm , v přepočtu na vlnčet, $1/\lambda$ je rozsah 12 000 – 10 cm^{-1} . V rámci našeho měření se budeme pohybovat ve střední infračervené oblasti o rozsahu vlnočtu 4000 – 400 cm^{-1} .



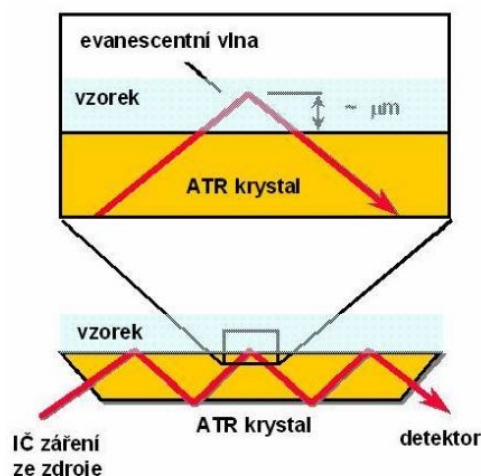
Obrázek 6.3 – Spektrometr s FT-IR Nicolet Impact 410 s krystalem ZnSe (autor)

Lze diagnostikovat degradaci a úbytek aditiv, degradační produkty oxidačních, sulfatačních a nitračních procesů, množství karbonu v oleji, dále i množství vody či přítomnost paliva ve zkoumaném vzorku (12). Touto metodou lze identifikovat organické a anorganické sloučeniny. V současnosti jsou hojně využívány infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FT–IR), tato metoda se vyznačuje ve srovnání se starší disperzní infračervenou spektrometrií vyšší citlivostí, vyšší energií průchodu do zkoumaného vzorku a vyšším poměrem signálu vůči šumu.

Výstupem měření je zobrazení infračerveného spektra. Jedná se o grafické zobrazení funkční závislosti energie, která může být vyjádřena v procentech a označujeme ji transmitance (T) nebo v jednotkách absorbance s označením (A) na vlnové délce vyobrazené ve vlnočtech v jednotkách cm^{-1} . Transmitanci (propustnost) definujeme jako poměr intenzity záření, které proniklo vzorkem, k intenzitě záření, které bylo uvolněno ze zdroje. Absorbance je posléze definovaná jako dekadický logaritmus $1/T$.

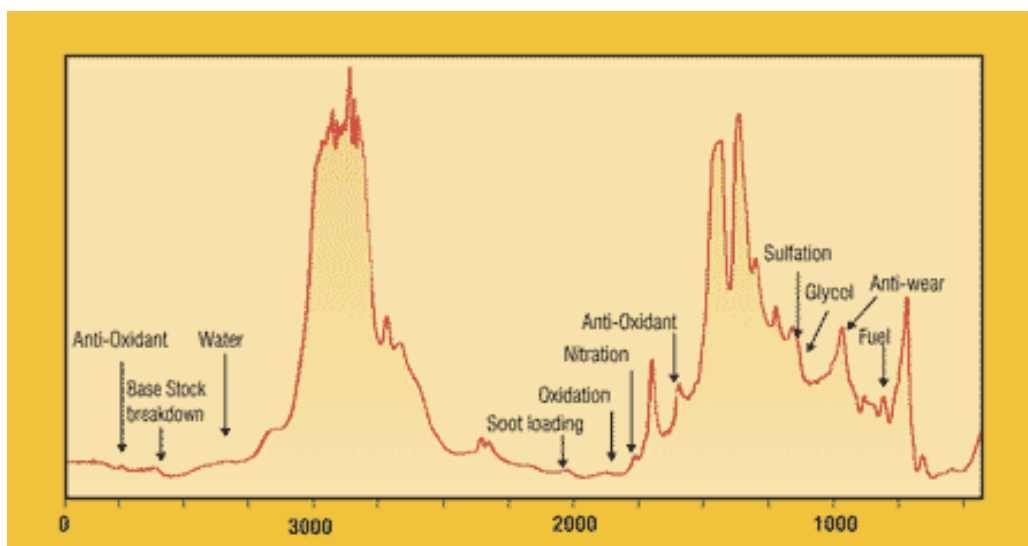
6.4.1 Postup měření

Provedení zkoušek proběhlo na základě interně stanovené metodiky, pracovního postupu, který není normovaně blíže specifikován. Po z kalibrování přístroje byl na krystal selenidu zinečnatého umístěna tenká vrstva zhomogenizovaného vzorku oleje. Krystal byl vrácen zpět měřicího přístroje. Olejový vzorek byl podroben prozářením infračerveným paprsek pomocí laseru, do hloubky olejového vzorku přibližně $1\text{--}2\ \mu\text{m}$, který způsobí interakci infračerveného záření s molekulami nebo skupinami molekul z olejového vzorku. Tím je způsobeno vybuzení molekul na vyšší vibrační hladiny, při kterých dochází k pohlcení záření s určitou hodnotou velikosti energie a ve spektru vznikají tzv. vibrační absorpční pásy. Pomocí polohy pásů ve spektru je možné identifikovat většinu sloučenin. Výsledkem měření je graf ve frekvenčním spektru. V našem případě jsme použili komparační metodu, kdy jsme spektrum z referenčního vzorku porovnávaly se spektrem z kontaminovaných olejových vzorků.



Obrázek 6.4 – Průchod infračerveného záření laseru přes krystal a olejový vzorek

Zdroj: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf?redirected>



Obrázek 6.5 – Charakteristické vady a jejich lokace na vlnočtech.

Zdroj: <https://www.machinerylubrication.com/Read/997/understand-lubricants>

6.5 Rentgenová spektrometrie

Jedná se o nedestruktivní metodu analyzování olejových vzorků, může být zjištěno chemické složení kapalných materiálů, kovových i nekovových materiálů a pevných či sypkých sloučenin. Měření jsme prováděli s pomocí energiově disperzního rentgenového fluorescenčního spektrometru SPECTRO XEPOS 3 v tribologické laboratoři. Přístroj je schopný detekovat jednotlivé prvky z periodické soustavy od sodíku až po uran, celkově až 82 prvků (12).

Princip rentgenofluorescenčního spektrometru spočívá v ozáření vzorku rentgenovým zářením z rentgenové lampy nebo radioaktivním zářením z radionuklidu. Tímto zářením dojde k vybuzení charakteristických spektrálních čar prvků vzorku. Takto vzniklé fluorescenční (sekundární) záření v sobě nese informaci o kvalitativním prvkovém složení vzorku (vlnové délky resp. energie spektrálních čar) a kvantitativním složení vzorku (četnost fotonů resp. intenzita daných spektrálních čar). Toto sekundární záření je dále zpracováno spektrometrem (13). V případě použití energiově disperzního spektrometru vstupuje záření přímo do polovodičového detektoru, a ten je schopen rozlišit energii jednotlivých fotonů.



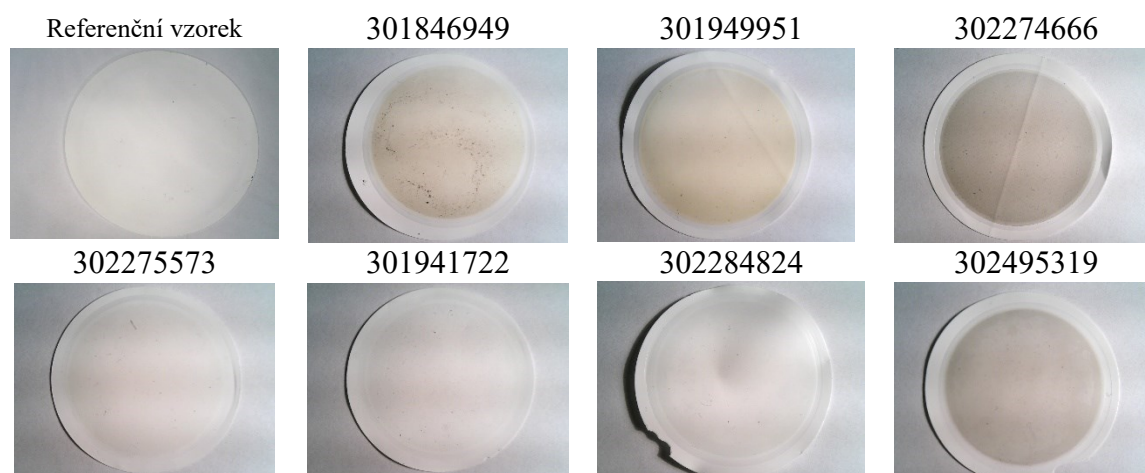
Obrázek 6.6 – ED-XRF Spektrometr, Spectro Xepos 3 (autor)

6.5.1 Postup měření

Provedení zkoušek proběhlo na základě interně stanovené metodiky, pracovního postupu, který není normovaně blíže specifikován. Požadovaný objem olejového vzorku ke zkoušce je 4 ml. Do kavity (miska pro zkoumaný vzorek) jsme vložili vzorek oleje k analyzování, který byl ozářen rentgenovým zářením (RTG) s pomocí rentgenové lampy. Toto RTG záření je vzorkem pohlceno a ve vzorku vybudí záření o vlnové délce odpovídající chemickému složení daného prvku. Takto vybuzený signál prvků je zachycen na snímač, který převede energii fotonů na elektrický pulzy. Intenzita radiace jednotlivých prvků vzhledem ke koncentraci obsažené ve vzorku se posléze vnitřně přepočítá pomocí sady kalibračních křivek a výsledkem je zobrazení prvků z periodické tabulky s obsaženou koncentrací ve vzorku v jednotkách ppm (part per milion), neboli množství mg/kg.

7 Dosažené výsledky

7.1 Stanovení nečistot



Obrázek 7.1 – Stav membránových filtrů po přefiltrování olejových vzorků (autor)

Na základě vizuální stránky získaného stavu membránových filtrů, lze konstatovat, že v olejových náplních vakuových vývěv dochází ke kontaminaci mechanickými částicemi. Tmavé zabarvení filtrační membrán značí, že se v oleji nachází vyšší obsah měkkých kalů. Vysokou míru částic můžeme vidět u vzorku 301846949, kde toto silné kontaminování částicemi bylo potvrzeno z výsledků analyzování distribučního rozdělení počtu částic.

Tabulka 8 – Výsledky měření částic pro kód a třídu čistoty

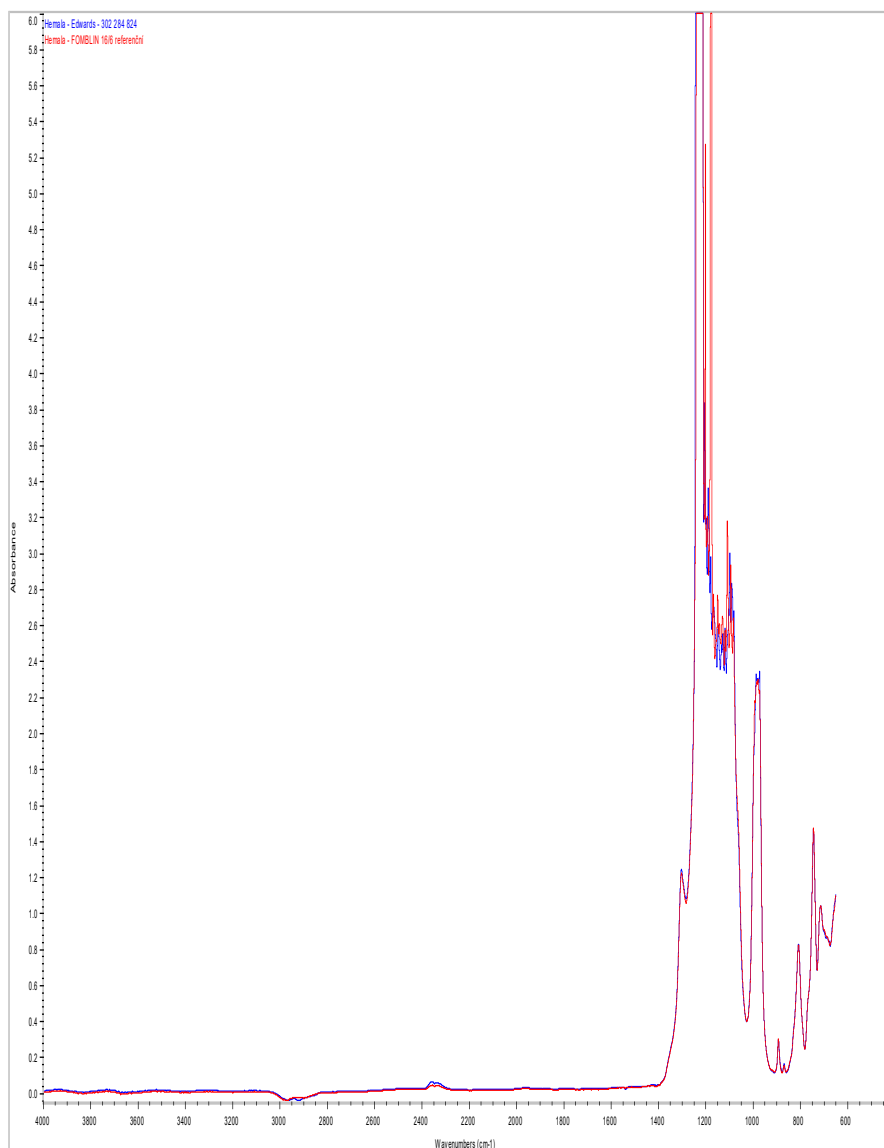
označení vzorku	doba provozu [hodiny]	poslední servis [roky]	kód čistoty ISO 4406/99	částice 4/6/14 [μm]	třída čistoty NAS 1638
referenční			12/11/9	22/ 18/ 4	3
302284824	31999	4	17/16/11	898/ 340/ 14	8
302495319	24802	3	16/15/12	445/ 188/ 25	8
302274666		1	21/20/18	17154/ 9773/ 1502	>12
301846949	2218	2	19/19/16	4570/ 2694/ 634	>12
301941722		2	17/17/14	1196/ 660/ 91	9
302275573	76224	2	18/17/14	1611/ 822/ 121	9
301949951		2	16/15/13	424/ 268/ 69	10

Z měření jsem získal výsledky, z kterých můžeme vyhodnotit dílčí závěry. U vývěv, kde známe dobu provozu, můžeme říci, že tato doba provozu nemá charakter chování v přímé úměře kontaminace oleje vzhledem k výši otěrových částic obsažených v olejové náplni. To může být způsobeno charakterem provozu daného zařízení. Kvalitu čistoty olejové úrovně

u referenčního vzorku, lze hodnotit jako olej s vysokou mírou čistoty. Dále je možno si všimnout, že nejvyšší obsah částic se nachází v úrovni 4 μm – 6 μm , původ těchto částic může být způsoben běžným provozním otěrem, avšak zvýšená míra těchto částic může vést k abrazivnímu opotřebení, které má vliv na těsnící prvky v třecím uzlu.

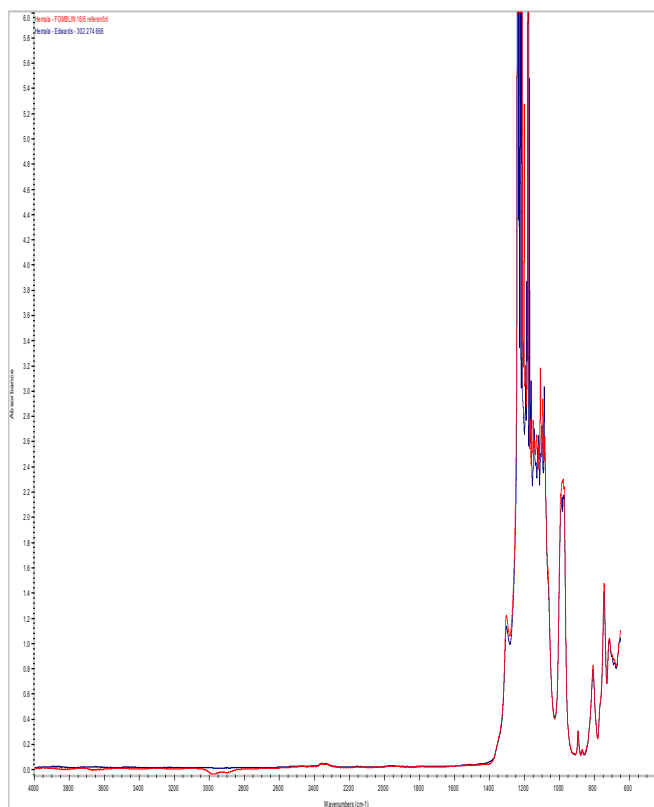
7.2 Výsledky spektrální analýzy z infračervené spektrometrie

Získané výsledky analýzy infračervené spektrometrie olejových vzorků přinesly informaci o tom, že v olejových vzorcích nedochází k žádným významným změnám, které by mohli ovlivňovat chování oleje. Výsledky spektrální analýzy jednotlivých vzorků, byly vždy proloženy s infračerveným frekvenčním spektrem referenčního vzorku a na základě porovnání těchto spekter jsem vytvořil závěr.



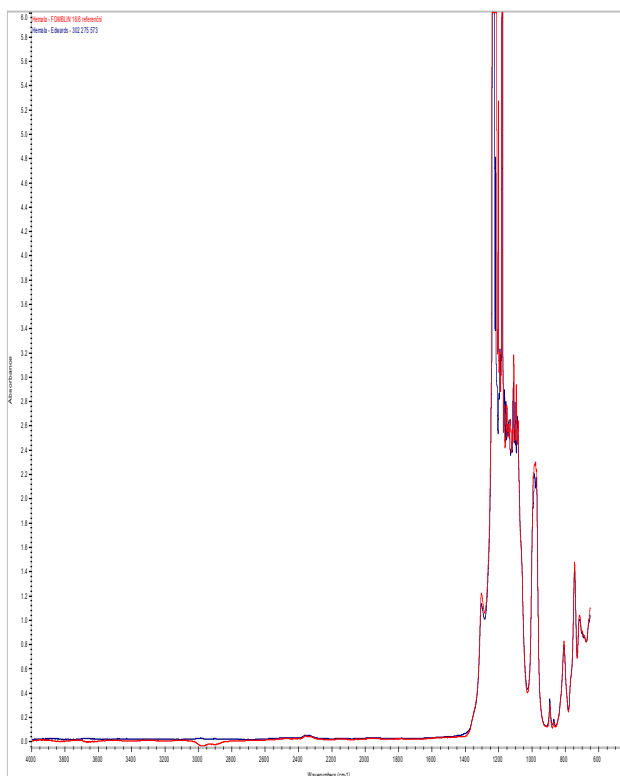
Obrázek 7.2 – Infračervené frekvenční spektrum pro vzorek 302284824 (autor)

Frekvenční spektrum olejového vzorku vývěvy s nejdelší dobou u zákazníka.



Obrázek 7.3 – Infračervené frekvenční spektrum pro vzorek 302274666 (autor)

Frekvenční spektrum olejového vzorku s nejvyšší kontaminací mechanickými částicemi.



Obrázek 7.4 – Infračervené frekvenční spektrum pro vzorek 302275573 (autor)

Frekvenční spektrum olejového vzorku vývěvy s nejdelším časovým úsekem v provozu.

7.3 Výsledky rentgenové spektrometrie

Tabulka 9 – Výsledky měření rentgenové spektrometrie s vybranými prvky (autor)

Kód čistoty	ČSN ISO 4406	12/11/9	19/19/16	16/15/13	21/20/18	18/17/14	17/17/14	17/16/11	16/15/12	
Třída čistoty	NAS 1638	3	>12	10	>12	9	9	8	8	
		označení vzorku								
		REFERENČNÍ	301846949	301949951	302274666	302275573	301941722	302284824	302495319	
Prvková analýza ED-XRF		hodnota								
obsah Fe	ppm (mg/kg)	metodika	< 1	61,8	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
obsah Cu			4,9	6,3	6,1	5,8	5,9	6,4	5,9	6,6
obsah Cr			6,9	9,9	9,9	6,9	9,5	7,5	8,8	7,8
obsah Sn			< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0	< 3,0
obsah Si			< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Aditiva, degradace, ostatní prvky		hodnota								
obsah S	ppm (mg/kg)	metodika	1,5	2,7	< 2	4	< 0,3	2,8	5,5	2,6
obsah P			< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 0,6	< 3	< 3
obsah Mg			387	392	400	< 101	393	408	< 101	< 101
obsah Na			2700	2683	2501	1189	2668	2641	1267	1246
obsah Zn			2,1	2,3	2,2	2	3,1	2,3	2,1	2,2
obsah Ca			< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
obsah Ta			27,5	25,1	26,2	25,7	26,1	25,2	25,8	24,9
obsah Co			22,4	22,4	18,4	22,3	19,4	21,7	20,5	17,6
obsah Hf			6,8	6,8	6,9	6,7	6,4	7,4	7,8	7,6
obsah K			5,3	< 10	< 10	6,8	6,5	< 10	8,7	5,6
obsah W			4,1	4,6	4,6	4,2	4,2	5,1	4,6	4,4
obsah Mn			3,8	2,4	2,4	3	2,9	2,6	1,6	2,6
obsah Ni			1,9	3	2,3	2,2	3,4	2,4	2	1,9
Obsah Ti			< 2	6,8	< 2	0,7	< 2	< 2	< 2	< 2

Data získaná měřením pomocí rentgenové spektrometrie nám prokázaly změnu koncentrací prvků ve složení olejových vzorků. Ve všech vzorcích je patrný mírný zvýšení koncentrací otěrových kovů, jedná se především o chrom a měď v porovnání s hodnotami z referenčního vzorku. Toto zvýšení může být způsobeno částečně běžným otěrem zařízení při provozu. Zcela jasné opotřebení je vidět na výsledcích u vzorku 301846949, kde je ve velmi vysoké koncentraci obsaženo železo a titan, což jsou otěrové kovy. A výsledky jsou v souladu s výsledky obsahu mechanických nečistot. V tomto případě byl u vakuové vývěvy hlášen únik oleje. A příčina může být právě vysoký obsah otěrových kovů, které zapříčiní abrazivní opotřebení.

Dále můžeme vidět změnu chemického složení u třech olejových vzorků. Došlo ke změně v koncentraci u dvou prvků obsažených v olejovém vzorku s nejvyšším množstvím zastoupením. Takováto změna by mohla být způsobena smícháním oleje jiného složení, než byla původní náplň. Toto tvrzení lze podložit tím, že v manuálu od výrobce zařízení je dovoleno používat kromě doporučeného oleje Fomblin Y LVAC 16/6, také olej s označením Krytox 1514. Referenční vzorek oleje Krytox 1514 jsem neměl k dispozici, tak abych provedl kontrolní měření pro porovnání, aby mohlo mít toto tvrzení ověřené.

Na všech olejových vzorcích je patrné, že se nemění aditivní skupina prvků ve složení fosfor, vápník a částečně zinek. Tyto prvky jsou obsaženy ve velmi nízké koncentraci a provozem zařízení nedochází k jejich změně.

Důležitou informaci je možné dostat z koncentrace křemíku, již v referenčním vzorku je pod hranicí detekce a dále v testovaných olejových vzorcích jeho koncentrace není zvýšena. Křemík je charakteristický prvek pro kontaminaci testovaného vzorku pokud se nachází ve zvýšené míře, s největší pravděpodobností se jedná o prachové částice, kterými by byl vzorek zasažen, ale takto je vidět, že olejové komory nejsou kontaminovány okolní atmosférou.

8 Závěr

V úvodu mé bakalářské práce jsem vypracoval teoretický přehled týkající se vakua a jeho využití v průmyslové praxi. Vakuum rozdělujeme do několika úrovní. Popsal jsem přehled vakuové techniky, provedl rozdělení zařízení dle funkce a principu fungování.

Dále jsem provedl teoretický rozbor oboru Tribologie a rozebral základní procesy tribologického systému. Pozornost byla dále věnována oboru zabývající se technickou diagnostikou, kde jsem se věnoval tribodiagnostice.

V závěru teoretické části jsem představil společnost zabývající se vakuovou technikou na světové úrovni. A obecně popsal proces servisního průběhu opravy vakuové vývěvy. Pak jsem navázal na popis problému, který se může projevit při provozu daného typu vývěvy a provedl shrnutí provedených měření a zkoušek.

Z dat získaných z měření jsem provedl analýzu výsledků a došel k závěru. Pokud je vývěva používána jinak než v souladu s provozní dokumentací. Dochází ke ztrátě funkčnosti kritických komponent pro spolehlivý provoz. Zejména pokud se vývěva přetíží a je vystavena vyšší pracovní zátěži, dochází ke zvyšování teploty olejové náplně, a to má za příčinu mimo jiné změnu viskozity oleje.

Za účelem zpracování praktické části jsem analyzoval olejové vzorky ze 7 vakuových vývěv, které byly porovnány s referenčním vzorkem. Olejové vzorky byly odebrány z vývěv řady iQBM. Použitý olej Fomblin Y-LVAC 16/6 patří do skupiny PFPE olejů. Jedná se o syntetický olej určený pro specifické aplikace s vysokou mírou zátěže. Vzorky vývěv byly odebrány z vývěv vyřazených z provozu a u některých bylo možné dohledat čas strávený v provozu. V praktickém měření jsem provedl tribologické zkoušky pro získání informací o stavu olejové náplně. Provedl jsem analýzu olejů na přístroji Nicolet, který využívá infračervenou spektrometrii a ze získaných dat bylo patrné, že v oleji nedochází k žádným charakteristickým změnám, které by měly vliv na stav olejové náplně.

Ze zkoušek čistoty oleje je zřejmá kontaminace otěrovými kovy a na základě zabarvení i měkkými kaly. Kvalita oleje na vstupu do vývěvy je na vysoké úrovni čistoty, avšak provozem dochází ke kontaminaci. V některých případech dochází ke kontaminaci zcela fatálních a majících vliv na spolehlivý provoz zařízení.

Z výsledků získaných při měření pomocí rentgenové spektrometrie, jsem získal informace o koncentraci prvků nacházející se v olejové náplni. A to především o zvýšení

koncentrace otěrových částic. A u třech vzorků došlo ke změně chemického složení, které má za příčinu výrazný úbytek aditivních prvků, hořčíku a sodíku.

Na základě provedených měření lze konstatovat, že u samotné olejové náplně není patrný charakter vedoucí k degradaci. Provozní selhávání vývěv se jeví jako kombinace pracovní zátěže, konstrukčního uzpůsobení těsnících uzlů a provozní údržby zařízení.

Pro zvýšení spolehlivosti provozu bych navrhol nastavit pravidelný režim odběrů olejových vzorků k analyzování. A na základě těchto dat je možné predikovat následné kroky a to například výměnu olejové náplně, která je obsažena ve vývěvě o celkovém objemu přibližně 1,8 litru.

Seznam použité literatury

- [1] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Vakuum [online]. ©2019 [cit. 17. 2. 2019]. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vakuum&oldid=16855747>>
- [2] ERBEN, Milan. Vakuová technika: Získání a měření vakua, využití vakuových technologií [online]. Univerzita Pardubice, 2008 [cit. 17. 2. 2019]. Dostupné z: https://www.upce.cz/sites/default/binary_www_old/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf
- [3] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Měření tlaku [online]. ©2018 [citováno 2. 3. 2019]. Dostupné z WWW: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_tlaku&oldid=16545321
- [4] Vakuum v praxi | Vakuum servis, s.r.o. Vakuové technologie, servis vakuových zařízení | Vakuum servis, s.r.o. [online]. © 2018 Vakuum Servis s.r.o. [cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.vakuum-servis.cz/vakuum-v-praxi>
- [5] BOUŠEK, Jaroslav. *Vakuová technika* [online]. Brno, 2005 [cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/Vakuova_technika_S_L.pdf
- [6] BEČKA, Jan. Tribologie. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
- [7] HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *Provoz, diagnostika a údržba strojů: Tribologie, základní pojmy* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 24. 3. 2019]. ISBN 978-80-248-3028-5. Dostupné z: http://www.340.vsb.cz/doc/cms_library/provoz-diagnostika-a-udrzba-stroju-189.pdf
- [8] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost: I. Tribodiagnostika*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. 155 s. ISBN 80-7078-883-6.
- [9] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe: Metody diagnostyki technicznej: teorie a praktyka*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [10] HELEBRANT, František. *PROVOZ A ÚDRŽBA STROJŮ: Technická diagnostika*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [11] Firemní podklady společnosti Atlas Copco Services, Tuřanka 1316/114, 627 00 Brno
- [12] Kurt J. Lesker Company. Solvay Specialty Polymers Fomblin Inert PFPE Fluid. *Vacuum Science Is Our Business*. Kurt J. Lesker Company | Home | Vacuum Science Is Our Business [online]. Copyright ©1996 [cit. 27. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.lesker.com/newweb/fluids/mechpumpoils-inert-solvayspecialtypolymers-fomblin/fomblinx/>
- [13] NEUWIRTHOVÁ, Lucie. RENTGENOVÁ FLUORESCENČNÍ SPEKTROMETRIE. : PRAKTICKÁ ČÁST [online]. [cit. 1. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.vsb.cz/export/sites/vsb/9360/cs/publikacni-cinnost/Metody-analyzy-materialu-a-nanomaterialu-II.pdf>

Seznam příloh

Příloha A	Tribodiagnostické zprávy
Příloha B	Frekvenční spektra z infračervené spektrometrie
Příloha C	Snímky kontaminace membránových filtrů